

На правах рукописи

Ковалевский Константин Андреевич

**СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
ДОНОРАМИ V-ГРУППЫ
В ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ**

05.27.01 – твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты,
микро- и нанoeлектроника, приборы на квантовых эффектах

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2012

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Шастин Валерий Николаевич.

Официальные оппоненты: кандидат физико-математических наук
Митягин Юрий Алексеевич,
Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

доктор физико-математических наук,
профессор Воробьев Леонид Евгеньевич,
Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет

Ведущая организация: Физико-технический институт
им. А.Ф. Иоффе РАН

Защита состоится 22 марта 2012 года в 16 часов на заседании диссертаци-
онного совета Д. 002.098.01 при Институте физики микроструктур РАН
(603950, Н. Новгород, ГСП-105).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики мик-
роструктур РАН.

Автореферат разослан 22 февраля 2012 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор

К.П. Гайкович

Актуальность темы

Поиск эффективных источников когерентного излучения в терагерцовом диапазоне частот 1–10 ТГц (дальнем ИК диапазоне 30–300 мкм) вызывает повышенный интерес уже на протяжении полувека. Это связано с огромным количеством возможных приложений: такие источники могут быть использованы в спектроскопии плазмы, газов и твердых тел, в радиоастрономии, в медицине, системах безопасности, в устройствах для хранения и передачи информации и т.д.

В настоящий момент существуют различные источники терагерцового излучения. К приборам вакуумной СВЧ электроники относятся лазеры на свободных электронах [1], имеющие рекордные мощности для данного диапазона, достигающие величин ~1МВт и возможность перестройки частоты в широком диапазоне, а также лампы обратной волны [2], с длинами волн до 100 мкм и мощностями ~1МВт. Недостатком первых является громоздкость. Вторые ограничены в продвижении в коротковолновую область из-за проблем миниатюризации замедляющих систем и уменьшения поперечных размеров пучка. К другому классу устройств ТГц диапазона можно отнести газовые лазеры, в которых получен большой набор линий генерации при оптическом возбуждении вращательно-колебательных переходов молекул (H_2O , D_2O , CH_3OH и другие) [3]. Тем не менее, ограниченный выбор линий и сложность в перестройке частот ограничивают сферу их применений.

Стремление получить компактный эффективный источник излучения терагерцового диапазона привело к реализации лазерного эффекта в полупроводниках. Первые полупроводниковые лазеры длинноволнового ИК излучения работали на межзонных переходах в узкозонных материалах $PbSnSe$ [4] и достигли длин волн ~40 мкм. Первыми источниками на внутризонных переходах стали лазеры на горячих дырках в германии: лазер на межподзонных переходах (70–200 мкм) [5,6], НЕ-МАГ (700–2000 мкм) [7], лазер на циклотронном резонансе горячих дырок в скрещенных электрическом и магнитном полях (100–400 мкм) [8,9]. Общим недостатком p - Ge лазеров, ограничивающих их применение, является малая эффективность, что затрудняет реализацию непрерывного режима генерации. Позднее появились работы, сообщающие о стимулированном излучении разогретыми электрическим полем дырками в одноосно деформированном германии с возможностью ра-

боты источника в непрерывном режиме и перестройкой длины волны вблизи 100 мкм путем изменения приложенного давления [10].

Наибольший резонанс получили успехи в развитии источников стимулированного излучения на переходах между состояниями размерного квантования $GaAs/AlGaAs$ и $InGaAs/AlInAs$ гетероструктурах при вертикальном транспорте электронов [11]. Возможность выращивать требуемые многослойные гетероструктуры с моноатомной точностью [12] позволила смоделировать и реализовать различные лазерные схемы. В результате квантово-каскадным лазерам удалось перекрыть диапазон 3 – 24 мкм, 67 – 200 мкм и работать при температурах до 186 К. [13,14] Достижения в этом направлении отчасти способствовали спаду интереса ко многим другим идеям создания полупроводниковых источников в этом диапазоне. Тем не менее, квантово-каскадные лазеры имеют ряд недостатков, среди которых отсутствие генерации в диапазоне 30–50 мкм из-за сильного решеточного поглощения [15].

В кремнии решеточное поглощение мало [15], и с учетом развитой технологии, создание ТГц источников на основе кремния представляет устойчивый интерес на протяжении десятков лет. К настоящему времени эффект стимулированного ТГц излучения получен на внутрицентровых переходах оптически возбуждаемых доноров V группы (сурьма, фосфор, мышьяк, висмут) в кремнии [16,17]. Линии генерации лежат в диапазоне 47–59 мкм и связаны с $2p \rightarrow 1s$ переходами. Данный источник является первым и пока единственным источником терагерцового диапазона в кремнии. Также можно отметить работы по получению инверсии населенностей в объемном $Si:B$ в скрещенных электрическом и магнитном полях [18] и получение электролюминесценции из $Si/SiGe$ гетероструктур [19,20].

Цель работы

Целью диссертационной работы являются экспериментальные исследования влияния одноосной деформации на формирования инверсии населенности между локализованными состояниями доноров V группы (Sb , P , As , Bi) в кремнии и характеристики стимулированного излучения при оптическом возбуждении CO_2 лазером.

Научная новизна

1. Получено стимулированное излучение из кремния, легированного донорами V группы (Sb , P , As , Bi), в условиях одноосного сжатия кристалла вдоль кристаллографического направления [100]; иссле-

дованы выходная интенсивность, временные и спектральные характеристики выходного излучения в зависимости от величины деформации.

2. Экспериментально показано, что изменение состояний доноров в одноосно деформированном кремнии может приводить к снижению порога генерации, росту квантовой эффективности, появлению новых частот генерации.
3. Экспериментально показано, что взаимодействие с междолинными фононами f - и g -типа определяет времена жизни примесных состояний $2p_0$, $2p_{\pm}$, $1s(T_2)$ доноров Sb , P и As в кремнии.

Научная и практическая значимость

Научная значимость состоит в получении новых знаний о физике релаксационных процессов состояний доноров в кремнии при их фотовозбуждении, способных приводить к формированию инверсной заселенности примесных состояний и генерации излучения в диапазоне 4,9–6,3 ТГц в условиях низких температур.

Практическая значимость определяется реализацией кремниевого лазера с малым порогом и новыми частотами генерации. Данный источник может быть использован в качестве гетеродина в радиоастрономии. Результаты работы показывают возможность получения непрерывного режима генерации в деформированном кристалле.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Междолинное рассеяние электронов с излучением акустических TA - g , LA - g , TA - f , LA - f и оптических LO - f , TO - f и LO - g фононов доминирует в процессе релаксации неравновесных состояний доноров V группы (Sb , P , As , Bi) в кремнии и существенно меняется при одноосной деформации кристалла.
2. Как направление, так и величина одноосной деформации кристалла существенно влияют на населенность рабочих переходов, эффективность, порог генерации и спектральные характеристики стимулированного излучения доноров V группы в кремнии при их оптическом возбуждении.
3. Для каждого из перечисленных доноров существует своя область оптимальной одноосной деформации кристалла, при которой достигается наибольшая эффективность стимулированного излучения при наименьшей пороговой интенсивности накачки. Параметры таких оптимальных деформаций зависят от элемента легирования и связа-

ны с величиной «химического сдвига» основного состояния.

4. Участие междолинных LA - f и TO - f фононов в релаксации доноров мышьяка и висмута приводит к переключению верхних состояний ($2p_{\pm}$, $2p_0$) рабочих переходов и частот стимулированного излучения при одноосной деформации кристалла кремния в направлении $[100]$.

Личный вклад автора в получение результатов

- Определяющий вклад в подготовку и проведение экспериментальных исследований по получению стимулированного излучения из кремния, легированного донорами V -группы, и измерению его выходной интенсивности в условиях одноосного сжатия кристалла и фотоионизации излучением CO_2 лазера [A1, A2, A5–A13, A15–A20].
- Равнозначный вклад в получение спектральных зависимостей стимулированного излучения доноров V группы при их фотоионизации в условиях одноосного сжатия кристалла (совместно с Р.Х. Жукавиным и С.Г. Павловым) [A1, A2, A5–A13, A15–A20].
- Равнозначный вклад в обсуждение и интерпретацию всех экспериментов по возбуждению доноров излучением CO_2 лазера в одноосно деформированном кремнии (совместно с Р.Х. Жукавиным, В.Н. Шастиным) [A1, A2, A5–A13, A15–A20], а также вопросов теоретического анализа внутрипримесной релаксации с испусканием междолинных фононов (совместно с В.В. Цыпленковым и В.Н. Шастиным) [A3, A4, A14].

Апробация работы

Материалы, вошедшие в диссертационную работу, обсуждались на семинарах ИФМ РАН (Нижний Новгород), Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, Института исследования планет (Берлин). Основные результаты диссертации представлялись на радиофизических конференциях ННГУ им. Н.И. Лобачевского (Нижний Новгород, 2003, 2004); всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, 2003); всероссийском семинаре по терагерцовой оптике и спектроскопии в рамках конференции по фундаментальным проблемам оптики (С.-Петербург, 2008); X, XII, XV международных симпозиумах по нанопизике и наноэлектронике (Нижний Новгород, 2006, 2008, 2011); 7, 9 и 10 Российских конференциях по физике полупроводников (Звенигород 2005, Новосибирск-Томск, 2009, Нижний Новгород, 2011); 29-ой, 31-ой, 34-ой и 35-ой Международной конференции по инфракрасному, милли-

метровому и терагерцовому излучению (Карлсруэ, Германия, 2004, Шанхай, Китай, 2006, Бусан, Корея, 2009, Рим, Италия, 2010); совещании по нанофотонике (Н.Новгород, 2004); XIX Международной конференции по когерентной и нелинейной оптике, лазерам, их приложениям и технологиям (Минск, Беларусь, 2007); 12-ой международной конференции по рассеянию фононов в конденсированных средах (Париж, Франция, 2007); 4-ой международной конференции по современной оптоэлектронике и лазерам (Алушта, Украина, 2008); 16-ой международной конференции по динамике электронов в полупроводниках (Монтпелье, Франция, 2009); международной конференции по ТГц и среднему ИК излучению (Турунк-Мармарис, Турция, 2009); II и III симпозиуме по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур (Москва, 2010, 2011).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ в реферируемых научных журналах и изданиях, а также 22 работы в материалах конференций.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав и заключения. Общий объем диссертации составляет 151 страницу, включая 135 рисунков и 9 таблиц. Список цитируемой литературы содержит 78 наименований, список публикаций автора по теме диссертации – 32 наименования.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана ее научная значимость, сформулированы цели и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту, а также представлены сведения о структуре и содержании работы.

В первой главе отражены теоретические и экспериментальные предпосылки для создания инверсии населенности в одноосно деформированном кремнии, легированном мелкими донорами при их оптическом возбуждении. Большой набор накопленных данных дает информацию об энергетическом спектре (Рис.1) и волновых функциях мелких доноров в деформированном кристалле, а также о релаксационных процессах, контролирующих электронные распределения в такой среде. Отражены особенности оптических свойств мелких доноров в одноосно деформированном кристалле кремния.

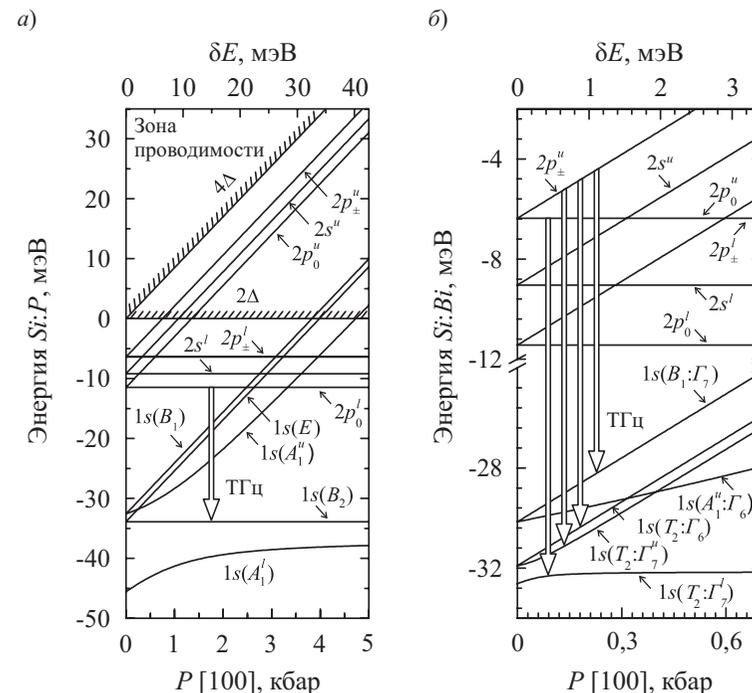


Рис.1. Рабочие переходы доноров V группы в деформированном кремнии при возбуждении CO₂ лазером и T=4,2 К. а) Si:P (1–5 кбар), б) Si:Bi (0–0,7 кбар). P – деформация сжатия [100], δE – энергия расщепления зоны проводимости (междолинное расщепление).

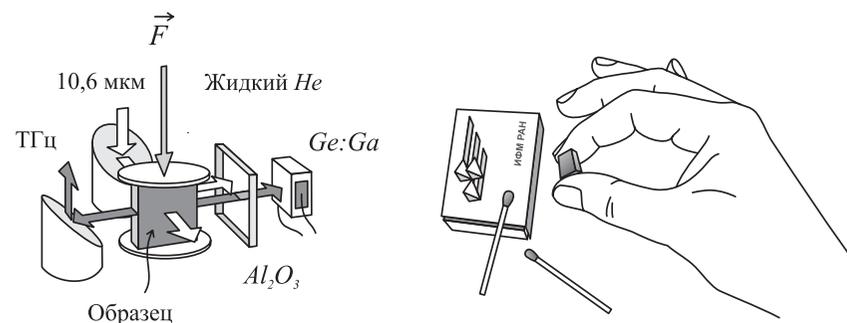


Рис.2. Слева: оптическая схема измерений; справа: характерные размеры кремниевых образцов 3×5×6 мм³, уровень легирования $N_d \sim 3 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$, концентрация акцепторов $N_a < 10^{13} \text{ см}^{-3}$.

Вторая глава содержит описание экспериментальной методики для наблюдения стимулированного излучения ТГц диапазона частот из мелких доноров в монокристаллическом кремнии при одноосном сжатии кристалла и фотовозбуждении CO_2 лазером (Рис.2). Приведены характеристики исследуемых в эксперименте образцов монокристаллического кремния, легированного мелкими донорами.

Третья глава посвящена исследованию стимулированного эффекта в $Si:Sb$ при фотовозбуждении CO_2 лазером в одноосно деформированном кристалле. Полученная зависимость интенсивности выходного стимулированного излучения от деформации носит немонотонный характер, и при больших накачках имеет максимум вблизи 0,4 кбар. При этом форма импульса стимулированного излучения также зависит от деформации (Рис.3,а). Область генерации определяется взаимодействием рабочих состояний с междолинными $TA-f$, $TA-g$ и $LA-g$ фононами и лежит в диапазоне давлений $0 \leq P < 1,5$ кбар. Имеют место две линии генерации: $2p_0^u \rightarrow 1s(T_2:G_6)$ и $2p_0^l \rightarrow 1s(T_2:G_7)$. Первый переход соответствует частоте $171,8 \text{ см}^{-1}$, которая остается постоянной при изменении давления. Энергия второго перехода зависит от величины и направления деформации и соответствует области частот $171,8-173 \text{ см}^{-1}$. Такое поведение определяется спин-орбитальным взаимодействием. При величине сжатия $\sim 0,7$ кбар порог генерации падает больше чем на два порядка величины до рекордно малых интенсивностей накачки $< 100 \text{ Вт/см}^2$ (Рис.3б).

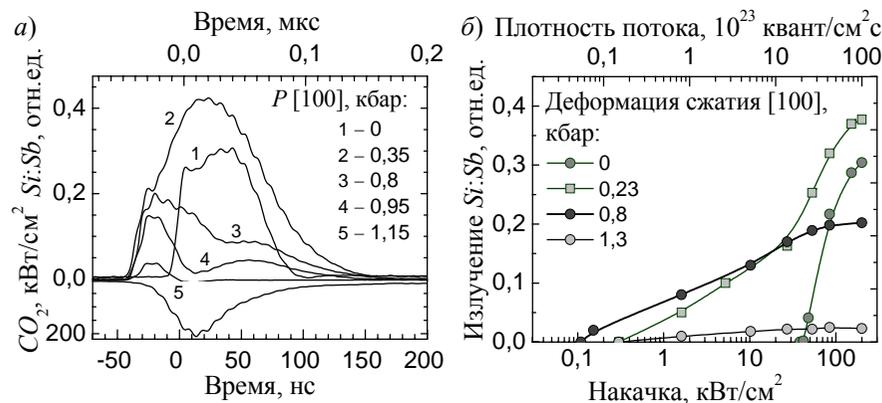


Рис.3. Зависимость интенсивности стимулированного ТГц излучения из образца $Si:Sb$ от а) времени, б) интенсивности ТЕА CO_2 накачки для различных значений деформации сжатия вдоль направления [100]. $T=4,2 \text{ К}$.

Четвертая глава представляет результаты исследования стимулированного излучения $Si:P$. Помимо стандартных образцов в эксперименте использовался монокристаллический изотопно-обогащенный 28-й кремний $^{28}Si:P$ (содержание ^{28}Si в матрице кристалла составляет 99,99495%), легированный фосфорными центрами. Оба материала имеют схожие экспериментальные данные. Область генерации лежит в диапазоне давлений $0 \leq P < 2,5$ кбар и определяется взаимодействием нижнего рабочего состояния $1s(B_2)$ с $TA-g$ фононами (Рис.4,а). Максимальный сигнал выходного ТГц излучения наблюдается для больших интенсивностей накачки $\sim 200 \text{ кВт/см}^2$ при давлении $\sim 0,6$ кбар. Линия излучения имеет частоту $180,7 \text{ см}^{-1}$, не меняется при деформации кристалла (Рис.4,б), и соответствует переходу $2p_0^l \rightarrow 1s(B_2)$ (Рис.1,а). Оптимальное давление, при котором наблюдается минимум порога, близко к 1 кбар. При такой величине сжатия значение порога падает до 200 Вт/см^2 .

Пятая глава содержит результаты экспериментов по измерению выходной интенсивности и спектральных характеристик в $Si:As$. Генерация получена во всем диапазоне исследовавшихся деформаций $0 \leq P \leq 4,4$ кбар. Обнаружен эффект переключения рабочих переходов при деформации $\sim 0,3$ кбар вдоль [100] (Рис.5,а). Частоте генерации $211,9 \text{ см}^{-1}$ наблюдаемой при $P < 0,35$ кбар соответствует переход $2p_{\pm}^l \rightarrow 1s(B_2)$, а частоте $171,5 \text{ см}^{-1}$ при $P > 0,3$ кбар – $2p_0^l \rightarrow 1s(B_2)$. Переключение рабочих переходов связано с подавлением распада состояний $2p_{\pm}$, $2s$ в основное состояние

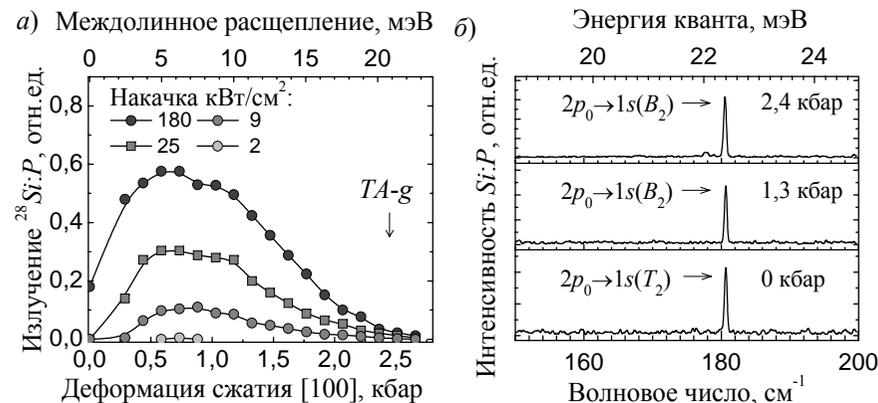


Рис.4. а) Зависимость интенсивности стимулированного излучения $^{28}Si:P$ от деформации сжатия вдоль направления [100]; б) спектрограммы $Si:P$ для различных деформаций сжатия [100]. $T=4,2 \text{ К}$.

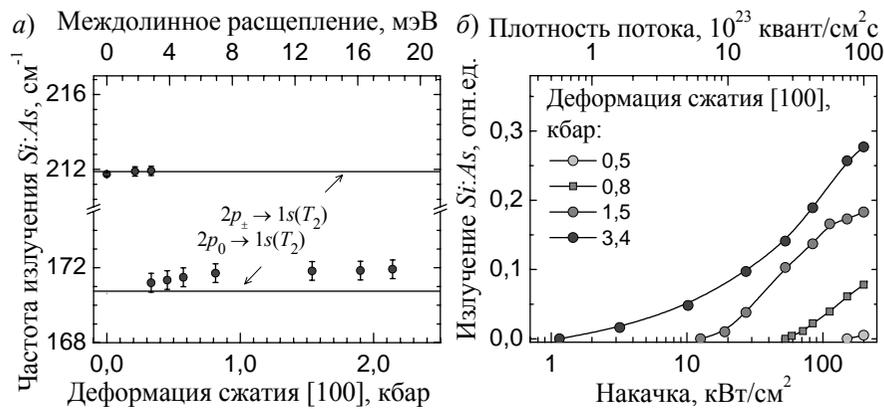


Рис.5. а) Зависимость частоты стимулированного излучения $Si:As$ от деформации сжатия вдоль $[100]$. Сплошными линиями показаны теоретические значения энергии переходов; б) интенсивность излучения $Si:As$ от величины CO_2 накачки. $T=4,2$ К.

$1s(A_1)$ по причине выхода из резонанса с междолинным $LA-f$ фоном за счет деформационного смещения энергии основного состояния. Получено также резкое падение пороговой интенсивности накачки до значений $250\text{--}300$ Вт/см² при давлении ~ 3 кбар (Рис.5,б). При этом давлении наблюдается и наибольший сигнал выходного стимулированного излучения для всех интенсивностей накачки.

Шестая глава посвящена изучению генерации в одноосно деформированном $Si:Bi$. Показано, что существует две области генерации $0 \leq P < 0,8$ кбар и $P > 1$ кбар (Рис.6,а). Провал в области $0,8\text{--}1$ кбар связан с взаимодействием состояния $2p_{\pm}$ с междолинным $TO-f$ фоном. При давлении $0,1$ кбар обнаружено резкое снижение интенсивности выходного излучения из-за резонанса состояния $2p_{\pm}$ с междолинным оптическим $LO-g$ фоном. Спектр излучения содержит *пять линий*, четыре из которых наблюдаются при давлениях $P < 1$ кбар (Рис.6,б) и связаны с переходами из возбужденных состояний $2p_{\pm}$ (Рис.1,б). При этом наличие спин-орбитального расщепления ($0,71$ мэВ) уровня $1s(T_2)$ дает возможность плавной перестройки частоты генерации в диапазоне $205,7\text{--}211,8$ см⁻¹ для группы переходов $2p_{\pm}^u \rightarrow 1s(T_2: \Gamma_6)$, $1s(T_2: \Gamma_7^u)$ и $2p_{\pm}^l \rightarrow 1s(T_2: \Gamma_7^l)$ посредством изменения величины и направления деформации. Другая наблюдаемая частота $191,8$ см⁻¹ соответствует линии $2p_{\pm}^u \rightarrow 1s(B_1: \Gamma_7)$. При давлении $P > 2$ кбар происходит смена верхнего рабочего состояния, связанная с выходом состояний $2p_0$ и $1s(A_1^l)$ из резонанса с междолинным $TO-f$

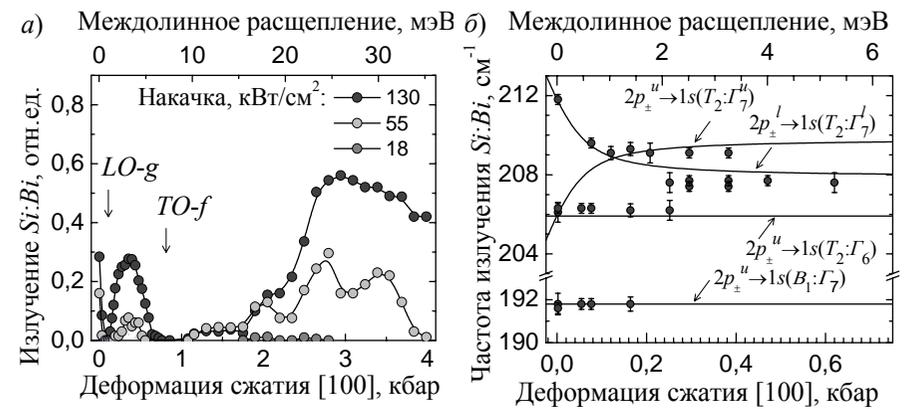


Рис.6. а) Интенсивность стимулированного излучения $Si:Bi$ от деформации сжатия вдоль $[100]$. б) Зависимость частоты стимулированного излучения $Si:Bi$ от деформации сжатия вдоль направления $[100]$. Сплошными линиями показаны теоретические значения энергии переходов. $T=4,2$ К

фоном. Новая частота генерации 164 см⁻¹ соответствует переходу $2p_0^u \rightarrow 1s(T_2: \Gamma_6)$. При деформации ~ 2 кбар достигается наименьшее значение пороговой интенсивности накачки $\sim 3,5$ кВт/см², которое является наибольшим среди исследуемых примесей.

Седьмая глава посвящена сопоставлению характеристик стимулированного излучения различных доноров V группы (Sb, P, As, Bi) при одноосном сжатии вдоль кристаллографического направления $[100]$. Наличие разного «химического сдвига» энергии основного состояния определяет особенности внутрицентральной релаксации в каждом доноре. Для примесей Sb, P и As , имеющих близкие энергии основного состояния, наблюдается следующая закономерность: с ростом «химического сдвига» растет минимальная пороговая интенсивность, а также значение оптимальной деформации сжатия. Большая величина химического сдвига в $Si:Bi$ сильно меняет картину внутрипримесной релаксации, в том числе и за счет взаимодействия с оптическими фонами; в результате оптимальные параметры висмута выпадают из общей закономерности.

Наблюдаемое в эксперименте падение пороговой интенсивности накачки в $10\text{--}100$ раз и увеличение лазерной эффективности в одноосно деформированном кристалле кремния с донорами V группы связано с изменением темпов внутридолинной релаксации, увеличением эффективности накачки верхних рабочих состояний и уменьшением внутрен-

них потерь за счет снижения с ростом деформации концентрации отрицательно заряженных доноров, являющихся активными поглотителями ТГц излучения.

Заключение содержит основные результаты диссертационной работы.

Основные результаты работы

1. Экспериментально показано, что одноосная деформация сжатия кристалла кремния вдоль кристаллографического направления [100] существенно влияет на стимулированное излучение оптически возбуждаемых доноров V группы (*Sb, P, As, Bi*), увеличивая его эффективность и в 10–100 раз снижая пороговую интенсивность накачки.
2. На основании проведенных оценок и наблюдаемых зависимостей показано, что поглощение на отрицательно заряженных D^- донорах в кремнии приводит к существенным внутренним потерям и значительно уменьшает коэффициент/сечение усиления в ТГц лазерах на донорах V группы в кремнии в условиях их фотовозбуждения.
3. Измерены оптимальные значения величины деформации сжатия вдоль оси [100] кристалла кремния для стимулированного излучения донорами V группы. Установлено, что этот параметр зависит от элемента легирования и определяется величиной «химического сдвига» основного состояния.
4. Полученные зависимости интенсивности ТГц стимулированного излучения различных доноров V группы в кремнии от одноосной деформации кристалла вдоль [100] позволили установить роль междолинных $TA-g$, $LA-g$, $TA-f$, $LA-f$, $LO-f$, $TO-f$ и $LO-g$ фононов в релаксации возбужденных состояний этих центров.
5. Экспериментально исследовано влияние одноосной деформации сжатия кристалла на спектр стимулированного излучения доноров V группы в кремнии. Обнаружено, что для доноров мышьяка и висмута сжатие кристалла приводит к переключению верхних рабочих состояний стимулированного излучения с $2p_{\pm}$ на $2p_0$. Эффект связан с влиянием деформации на релаксацию состояний с участием междолинных $LA-f$, $TA-f$ и $TO-f$ фононов.
6. Экспериментально обнаружено, что стимулированное излучение оптически возбуждаемых доноров висмута в [100] деформированном кремнии ($2 \text{ кбар} < P < 3,3 \text{ кбар}$) развивается с частотой 164 см^{-1} на переходах между состояниями доноров верхних 4Δ долин.

Цитируемая литература

- [1] Knippels, G.M.H. Generation of frequency-chirped pulses in the far-infrared by means of a sub-picosecond free-electron laser and an external pulse shaper / G.M.H. Knippels, A.F.G. van der Meer, R.F.X.A.M. Mols, P.W. van Amersfoort, R.B. Vrijen, D.J. Maas, L.D. Noordam // Opt. Commun. – 1995. – Vol.118. – P. 546-550.
- [2] Kozlov, G.V. Coherent Source for Submillimeter Wave Spectroscopy / Kozlov G.V., Volkov A. A. // Topics in Applied Physics, edited by G. Gruner, published by Springer-Verlag - 1998. – Vol. 74 – P. 51-109.
- [3] De Temple, Th. Pulsed Optically Pumped Far Infrared Lasers in Infrared and Millimeter Waves/ Th. de Temple // Edited by K.J. Button. N.Y. – 1979. – Vol.1 – P. 129.
- [4] Мурашов, М.С. О временных задержках генерации излучения в лазерных диодах на основе халькогенидов свинца / М.С. Мурашов, А.П. Шотов // Квантовая электроника. – 1995. – Т.22. Вып.12. – С. 1255.
- [5] Андронов, А.А. Стимулированное излучение в длинноволновом ИК диапазоне на горячих дырках *Ge* в скрещенных электрическом и магнитном полях / Андронов А.А., Зверев И.В., Козлов В.А., Ноздрин Ю.Н., Павлов С.А., Шастин В.Н. // ЖЭТФ – 1984. – Т.40. Вып.2. – С.69-71.
- [6] Муравьев, А.В. Перестраиваемый узкополосый лазер на междолинных переходах дырок германия / А.В. Муравьев, С.Г. Павлов, В.Н. Шастин // Квантовая электроника. – 1993. – Т. 20. Вып. 2. – С.142-148.
- [7] Gavrilenko, V.I. Negative mass cyclotron resonance maser / V.I. Gavrilenko and Z.F. Krasil'nik // Opt.Quant.Elect. – 1991. – Vol.23. – S323–S329.
- [8] Ivanov, Y.L. Generation of Cyclotron Radiation by Light Holes in Germanium / Ivanov Y.L. // Optical and Quantum Electronics – 1991. – Vol.23. – S253-S265.
- [9] Mitygin, Yu.A. Wide-Range Tunable Sub-Millimeter Cyclotron Resonance laser / Mitygin Yu.A., Murzin V.N., Stoklitsky S.A., Chebotarev A.P. // Optical and Quantum Electronics – 1991. – Vol.23. – S307-S311.
- [10] Алтухов, И. В. Междолинное излучение горячих дырок в *Ge* при одно-

- осном сжати / И. В. Алтухов, М.С. Каган, В.П. Синис // Письма в ЖЭТФ. – 1988. – Т.47. – С. 136.
- [11] Faist, J. Long-wavelength infrared semiconductor lasers / Jerome Faist and Carlo Sirtori // Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. – 2004. – P.217–278
- [12] Kohler, R. Terahertz semiconductor-heterostructure laser / Kohler R., Tredicucci A., Beltram F., Beere H., Linfield E., Davies G., Ritchie D., Iotti R.C., and Rossi F. // Nature. – 2002. – Vol. 417. – P. 156–159.
- [13] Williams, B. S. Terahertz quantum-cascade lasers / Williams B.S. // Nature Photonics. – 2007. – Vol. 1. – P. 517-523.
- [14] Kumar, S. Recent Progress in Terahertz Quantum Cascade Lasers / S.Kumar // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2011. – v.17 issue 1. – P. 38-41
- [15] Dargys, A. Handbook on Physical Properties of *Ge*, *Si*, *GaAs* and *InP* / Dargys A. and J. Kundrotas // Science and Encyclopedia Publishers, Vilnius – 1994. – P.262
- [16] 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. Rümmele, 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.
- [17] Pavlov, S. G. Terahertz silicon lasers: Intracenter optical pumping / S. G. Pavlov, H.-W. Hübers, M. H. Rümmele, 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.
- [18] Muravjov, A.V. Amplification of Far-Infrared Radiation on Light Hole Cyclotron Resonance in Silicon in Crossed Electric and Magnetic Fields / Muravjov A.V., Strijbos R.C., Wenckebach W.Th., and Shastin V.N. // 21th Int. Conf. on Infrared and Millimeter Waves, Berlin. Conference proceeding – 1996. – CTh11.
- [19] Dehlinger, G. Intersubband electroluminescence from silicon-based quantum cascade structures / Diehl L., Gennser U., Sigg H., Faist J., Ensslin K., Grutzmacher D., Muller E. // Science. – 2000. Dec 22. – 290 (5500). – P. 2277-2280.
- [20] Kagan, M. S. THz lasing of *SiGe/Si* quantum-well structures due to shallow acceptors / M. S. Kagan, I. V. Altukhov, E. G. Chirkova, V. P. Sinis,

R. T. Troeger, S. K. Ray, and J. Kolodzey // Physica Status Solidi B – 2003. – Vol.235. Issue 1. – P. 135–138.

Список работ автора по теме диссертации

- [A1] Pavlov, S.G. Low-threshold terahertz *Si:As* laser / S.G. Pavlov, U. Boettger, H.-W. Huebers, R.Kh.Zhukavin, K.A.Kovalevsky, V.V. Tsyplenkov, V.N.Shastin, N. V. Abrosimov, H. Riemann // Appl. Phys. Lett.– 2007.– v.90.– P. 141109-(1-2)
- [A2] Zhukavin, R. Kh. Influence of uniaxial stress on stimulated terahertz phosphor and antimony donors in silicon / R.Kh. Zhukavin, V.V. Tsyplenkov, K.A. Kovalevsky, V.N. Shastin, S.G. Pavlov, U. Bottger, H.-W. Hubers, H. Riemann, N.V. Abrosimov, and N. Notzel // Appl. Phys. Lett.– 2007.– v.90.– P. 051101-(1-3)
- [A3] Цыпленков, В.В. Релаксация возбужденных состояний доноров в кремнии с излучением междолинных фононов / Цыпленков В.В., Ковалевский К.А., Шастин В.Н. // Физика и техника полупроводников. – 2008. – том 42, вып. 9. – С. 1032
- [A4] Цыпленков, В.В. Влияние одноосной деформации на релаксацию возбужденных состояний мелких доноров в кремнии при взаимодействии с междолинными фононами / Цыпленков В.В., Ковалевский К.А., Шастин В.Н. // Физика и техника полупроводников. – 2009. – том 43, вып. 11. – С.1450
- [A5] Pavlov, Sergey G. Optimizing the Operation of Terahertz Silicon Lasers / Sergey G. Pavlov, Heinz-Wilhelm Hubers, Ute Bottger, Roman Kh. Zhukavin, Veniamin V. Tsyplenkov, Konstantin A. Kovalevsky and Valery N. Shastin // Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal. – 2009. – V. 15, № 3. – P. 925
- [A6] 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. Hubers // J. of Physics: Conference Series. – 2009. – v.193, № 012086. – P.1–4
- [A7] Zhukavin, R.Kh. Spin-orbit coupling effect on bismuth donor lasing in stressed silicon / R.Kh. Zhukavin, K.A. Kovalevsky, V.V. Tsyplenkov, V.N. Shastin, S.G. Pavlov, H.-W. Hubers, H. Riemann, N.V. Abrosimov and A. K. Ramdas // Appl. Phys. Lett.. – 2011. – v.99. – 171108-(1–3)
- [A8] Zhukavin, R.Kh. Silicon THz Lasers Performance Under Uniaxial Stress/ R.Kh. Zhukavin, S.G. Pavlov, H.-W. Hubers, K.A. Kovalevsky,

V.V. Tsyplenkov, V.N. Shastin // The joint 31st International Conference on Infrared and Millimeter Waves and 14th International Conference on Terahertz Electronics, 18th to 22nd 2006 Shanghai, China.– P.393

- [A9] Shastin, V.N. THz lasing from shallow donors in silicon/ V.N. Shastin, R.Kh. Zhukavin, V.V. Tsyplenkov, K.A. Kovalevsky, S.G. Pavlov, H.-W. Huebers // ICONO/LAT 2007, May 28-June 1, 2007, Minsk, Belarus.
- [A10] Pavlov, S.G. Stress-controlled impurity-phonon resonances in terahertz silicon lasers / S.G. Pavlov, H.-W. Huebers, U. Bottger, R.Kh. Zhukavin, V.V. Tsyplenkov, K.A. Kovalevsky, V.N. Shastin, N.V. Abrosimov, N. Notzel, H. Riemann // Phonons 2007: Book of abstracts of the 12th Int. Conf. on Phonon scattering in condensed matter, Conservatoire National des Arts et Metiers, Paris, 15-20 July 2007. – P. 132-133
- [A11] Shastin, Valery N. THz lasing of shallow donors in stressed silicon crystal / Valery N. Shastin, Roman Kh. Zhukavin, Konstantin A. Kovalevsky, Veniamin V. Tsyplenkov, Sergey G. Pavlov, Heinz-Wilhelm Hubers // CAOL 2008: 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and lasers, Alushta, Crimea, Ukraine, 2008, IEEE Catalog No CFP08814-PRT. – P.254-256
- [A12] Shastin, V.N. Advanced THz laser performance of shallow donors in axially stressed silicon crystal / V.N. Shastin, R.Kh. Zhukavin, K.A. Kovalevsky and V.V. Tsyplenkov, S.G. Pavlov and H.-W. Hubers // Optoelectronics and Nanostructures: 16th International conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Montpellier, France, August 23-28, 2009. – P.173
- [A13] Ковалевский, К.А. Стимулированное излучение доноров в деформированном кремнии / К.А. Ковалевский, В.Н. Шастин, Р.Х. Жукавин // IX Российская конференция по физике полупроводников, Новосибирск-Томск, 28 сентября- 3 октября 2009. – С.239
- [A14] Tsyplenkov, V.V. Lifetimes of operating states in terahertz intracenter silicon lasers / V.V. Tsyplenkov, R.Kh. Zhukavin, K.A. Kovalevsky, V.N. Shastin, H.-W. Huebers, S.G.Pavlov, N.V. Abrosimov, P.J. Phillips, D.A., Carder // NATO Advanced Research Workshop on Terahertz and Mid Infrared Radiation: Basic Research and Applications TERA - MIR 2009, 3-6 November 2009: Institute of Theoretical and Applied Physics, Turunc-Marmaris, Turkey.– P.85.
- [A15] Zhukavin, R.Kh. Fine Tuning of THz Emission Line in *Si* Lasers /

R.Kh. Zhukavin, K.A. Kovalevsky, V.V. Tsyplenkov, V.N. Shastin, S.G. Pavlov, H.-W. Huebers // Proceedings of IRMMW-THz (2009) conference, September 21-25, Paradise Hotel, Busan, Korea, M3A03.0325

- [A16] Шастин, В.Н. Стимулированное излучение доноров в одноосно деформированном кремнии / В.Н. Шастин, Р.Х. Жукавин, К.А. Ковалевский, В.В. Цыпленков, С.Г. Павлов, Н.-W. Hubers // Труды II симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур, М.: ФИАН. – 2010. – С.49-58
- [A17] Zhukavin, Roman Kh. Stress dependent frequency shift in *Si:Bi* and *Si:Sb* THz lasers / Roman Kh. Zhukavin, K. A. Kovalevsky, V. V. Tsyplenkov, V. N. Shastin, S. G. Pavlov, U. Bottger, N. Notzel, H. Riemann, N. V. Abrosimov, and H.-W. Hubers // The 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves (IRMMW-THz 2010), Rome (Italy), September 5 to September 10, 2010
- [A18] Shastin, V.N. Gain and efficiency of THz donor lasing in axially stressed silicon crystal / V.N. Shastin, R.Kh. Zhukavin, K.A. Kovalevsky, V.V. Tsyplenkov, S.G. Pavlov, and H.-W. Hubers // The 35th International Conference on Infrared, Millimeter and THz Waves (IRMMW-THz 2010), Rome (Italy), September 5 to September 10, 2010
- [A19] Шастин, В.Н. Особенности стимулированного излучения доноров V группы в одноосно деформированном кремнии / В.Н. Шастин, Р.Х. Жукавин, К.А. Ковалевский, В.В. Цыпленков, S.G. Pavlov, U. Botger, H. Riemann, N.V. Abrosimov, and H.-W. Huebers // Труды X Российской конференции по физике полупроводников, Нижний Новгород, 19-23 сентября 2011. – С.12
- [A20] Жукавин, Р.Х. Влияние спин-орбитального взаимодействия на стимулированное излучение донорами в деформированном кремнии / Р.Х. Жукавин, К.А. Ковалевский, В.В. Цыпленков, В.Н. Шастин, S.G. Pavlov, U. Botger, H. Riemann, N.V. Abrosimov, H.-W.Huebers // Труды X Российской конференции по физике полупроводников, Нижний Новгород, 19-23 сентября 2011. – С.168

Ковалевский Константин Андреевич

**СТИМУЛИРОВАННОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ
ДОНОРАМИ V-ГРУППЫ
В ДЕФОРМИРОВАННОМ КРЕМНИИ**

Автореферат

Подписано к печати 26 января 2012 г. Тираж 100 экз.
Отпечатано в Институте физики микроструктур РАН,
603950, г. Н. Новгород, ГСП-105.