

На правах рукописи

Цыпленков Вениамин Владимирович

**РЕЛАКСАЦИЯ РАБОЧИХ СОСТОЯНИЙ В ЛАЗЕРЕ  
НА ВНУТРИЦЕНТРОВЫХ ПЕРЕХОДАХ ДОНОРОВ  
V ГРУППЫ В КРЕМНИИ ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ ФОНОНОВ**

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 2010 г.

Работа выполнена в Институте физики микроструктур РАН, Н.Новгород

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
профессор Ясиевич Ирина Николаевна,  
Физико-технический институт им.А.Ф.  
Иоффе

доктор физико-математических наук,  
профессор Демидов Евгений Сергеевич,  
Нижегородский государственный  
университет им. Н.И.Лобачевского

Ведущая организация: Институт радиотехники и электроники  
им. В.А. Котельникова РАН, Москва

Защита состоится 23 декабря 2010 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д 002.098.01 при Институте физики  
микроструктур РАН (603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института физики  
микроструктур РАН

Автореферат разослан 22 ноября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физики математических наук, проф.

К.П.Гайкович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Возрождение интереса к изучению физики мелких доноров в кремнии связано с возможностью развития полупроводниковых источников стимулированного терагерцового (ТГц) излучения (47-58 мкм). Такого рода источники могли бы использоваться в различных приложениях: спектроскопии газов, твердых тел, плазмы, мониторинге окружающей среды, радиоастрономии, создании новых средств контроля и обнаружения скрытых предметов, разработке методов диагностики в медицине.

Первые полупроводниковые лазеры длинноволнового ИК излучения работали на межзонных переходах в узкозонных материалах PbSnSe [1]. Такой подход позволил достичь длинноволновой границы  $\lambda \approx 40$  мкм. Первыми источниками на внутризонных переходах стали лазеры на горячих дырках в германии: НЕМАГ [2], лазер на циклотронном резонансе [10, 11] и лазер на межподзонных переходах горячих дырок германия [3, 4]. Эти источники позволили перекрыть диапазоны (700÷ 2000 мкм), (100÷ 400 мкм) и (70÷ 200 мкм) соответственно. Одним общим недостатком перечисленных лазеров является малая эффективность ( $\eta \sim 10^{-4}$ ), что затрудняет реализацию непрерывного режима генерации. Позже появилось сообщение о стимулированном излучении резонансных состояний акцепторов в одноосно деформированном германии при разогреве дырок электрическим полем. Как утверждается, этот источник ИК излучения может работать в непрерывном режиме на длинах волн  $\sim 100$  мкм [5].

Самый большой резонанс получили успехи в развитии источников стимулированного излучения на переходах между состояниями размерного квантования в GaAs/AlGaAs и AlInAs/GaInAs гетероструктурах при вертикальном транспорте электронов [6, 7]. Квантово-каскадные лазеры позволили перекрыть диапазоны от 3÷ 24 мкм и 67÷ 200 мкм., но они не работают в диапазоне 30÷ 50 мкм из-за сильного решеточного поглощения в полосе остаточных лучей.

В кремнии и структурах на его основе такое поглощение мало и создание ТГц лазеров в таких средах считается перспективным [8, 9].

К настоящему времени эффект стимулированного ТГц излучения в кремнии получен, и он связан с внутрицентровыми переходами оптически возбуждаемых доноров V группы в кремнии. Лазерный эффект получен на  $2p_0-1s$  переходах в Si:P и Si:Sb и  $2p_0/2p_{\pm}-1s(E, T_2)$  переходах в Si:As и Si:Bi. Соответствующие частоты генерации

недоступны для квантово-каскадных лазеров и лежат в диапазоне 47-59 мкм. В то же время такие источники находятся в стадии развития и их потенциал не реализован в полной мере. Последнее во многом объясняется отсутствием адекватного описания процессов формирующих неравновесные состояния и населенность рабочих состояний активной среды. Данная работа призвана, хотя бы частично, устранить имеющиеся недостатки теоретического описания.

### Цель работы

Конкретной целью диссертационной работы является вычисление времен жизни состояний мелких доноров в кремнии, определяемых междолинными процессами электрон-фононного взаимодействия, в условиях низких температур; расчет темпов междолинных переходов в зависимости от деформации кристалла Si. Важной составляющей является интерпретация полученных данных по экспериментальному изучению стимулированного излучения доноров в кремнии.

### Научная новизна

- Получены сравнительные значения скоростей релаксации различных состояний доноров фосфора, сурьмы, мышьяка и висмута в кремнии при междолинном рассеянии на фононах  $f$  и  $g$  типа и показано, что рассеяние на акустических  $f$ -фононах вносит существенный вклад в релаксацию примесных состояний.

- Исследована зависимость темпов междолинной релаксации для доноров V группы в кремнии от одноосной деформации кристалла.

- Показано, что наблюдаемое в эксперименте изменение характеристик излучения лазера на мелких донорах в кремнии (интенсивность, порог накачки, частота излучения) при одноосной деформации кристалла в значительной мере определяется зависимостью от деформации релаксации неравновесных состояний центров легирования на междолинных фононах.

### Научная и практическая значимость работы

Проведенные расчеты дают новое знание о неравновесных состояниях мелких доноров в кремнии и важны для понимания процессов лежащих в основе лазеров на внутрицентровых переходах доноров в кремнии.

### Основные положения, выносимые на защиту

1. Междолинное рассеяние с излучением  $TA-f$ ,  $TA-g$ ,  $LA-f$ ,  $LA-g$ ,  $TO-f$ ,  $LO-g$  фононов определяют распад нижних возбужденных состояний мелких доноров в кремнии при низких температурах.

2. Химический сдвиг  $1s$ -состояний доноров V группы в кремнии, связанный с потенциалом центральной ячейки, существенно влияет на время жизни состояния  $2p_0$  и определяет тип фононов, ответственных за распад отщепленной группы состояний  $1s(E, T_2)$ .

3. Одноосная деформация кристалла кремния существенно меняет как маршруты, так и времена релаксации возбужденных состояний доноров V группы в кремнии; при этом могут меняться типы фононов, доминирующие в релаксационном процессе.

4. Одноосная деформация кристалла кремния, приложенная в направлении (100), существенно влияет на времена жизни рабочих состояний лазера на внутрицентровых переходах мелких доноров в кремнии, и, как следствие, при оптимальных деформациях может увеличить время жизни верхнего рабочего состояния и коэффициент усиления активной среды.

#### **Личный вклад автора**

-Равнозначный вклад в выбор модели расчета темпов междолинных переходов между состояниями доноров в кремнии при взаимодействии с фононами (совместно с Демидовым Е.В.) [A1, A4, A5].

-Определяющий вклад в проведение расчетов темпов междолинной релаксации состояний мелких доноров [A4, A5].

-Равнозначный вклад в интерпретацию результатов эксперимента (совместно с Жукавиным Р.Х.) [A2, A3, A6, A7].

#### **Реализация результатов работы**

Полученные результаты применялись при интерпретации данных эксперимента и способствовали проведению уточняющих измерений при исследовании стимулированного излучения донорами в кремнии.

#### **Апробация работы**

Материалы диссертационной работы обсуждались на семинарах ИФМ РАН, на радиофизических конференциях в ННГУ им. Лобачевского (2003 г.), на трех всероссийских молодежных конференциях по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике (С.-Петербург, 2003 г., 2005 г., 2006 г.), на всероссийском семинаре по терагерцовой оптике и спектроскопии в рамках конференции «Фундаментальные проблемы оптики» (С.-Петербург, 2008 г.). Они представлены в материалах симпозиумов по нанофизике и наноэлектронике (2006 г., 2008 г.), на Российской конференции по физике полупроводников (Новосибирск-Томск, 2009г), международной конференции TERA - MIR (Turkey, 3-6 November 2009г).

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 26 печатных работ, в том числе 7 статей в рецензируемых журналах, а так же 7 публикаций в материалах международных и 11 в материалах российских конференций.

#### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Общий объем составляет 98 страниц, включая 33 рисунка и 7 таблиц. Список цитированной литературы содержит 54 наименования, список публикаций автора по теме диссертации – 26 наименований.

#### **Содержание работы**

**Во введении** показана проблематика и обоснована актуальность проблемы исследования.

**В первой главе** представлена обзорная часть работы, цель которой – позиционирование проблемы исследования в настоящей работе относительно других исследований, касающихся мелких примесей и электрон-фононного взаимодействия в кремнии. Далее изложена теоретическая модель, в рамках которой проведены все расчеты, что включает описание состояний мелких доноров в кремнии и излагается используемый подход к проблеме взаимодействия связанных потенциалом примеси электронов с фононами. В описании взаимодействия электронов с междолинными фононами важными параметрами являются междолинные деформационные потенциалы  $-D_k$ , которые характеризуют связь электронов с фононами. Они отличаются для фононов, принадлежащих различным ветвям дисперсионной характеристики. Вероятность междолинного перехода при излучении (поглощении) фонона между состояниями электрона проводимости  $k'$  и  $k$  согласно «золотому» правилу Ферми имеет вид [10]:

$$P(k', k) = \frac{\pi(D_k k)^2}{\rho V \omega_q} \delta(E(k') - E(k) - \hbar \omega_q)$$

где  $E(k')$  и  $E(k)$  – энергии конечного и начального состояний электрона,  $k$  и  $k'$  – начальный и конечный импульс,  $\omega_q$  – частота излучаемого (поглощаемого) фонона,  $\rho$  – плотность материала,  $V$  – его объем. Разумеется,  $D_k$  зависят от волнового вектора фонона, но обычно, в нулевом приближении, этим пренебрегают.

Междолинное рассеяние оказывает большое влияние на подвижность электронов в непрямозонных полупроводниках, подобных Si, и зачастую значения данных потенциалов определяются на основе

сравнения результатов моделирования транспортных свойств с данными эксперимента [11]. Но в рассеянии электронов участвуют одновременно различные фононные моды, что делает процедуру подгонки достаточно грубой и значения деформационных потенциалов в разных работах заметно отличаются. Следует также отметить, что формально в нулевом приближении, т.е. когда деформационные потенциалы взаимодействия не зависят от волнового вектора фонона (нулевой порядок по  $q$ ), далеко не все междолинные переходы разрешены. Междолинные переходы при взаимодействии со многими фононными модами оказываются запрещенными симметрией. Как показано в работах [12,13], в нулевом порядке разложения междолинного деформационного потенциала по волновому вектору фонона  $f$ -переходы в кремнии возможны только при взаимодействии с LA и TO фононами,  $g$ -переходы – только с LO-фононами. Однако существуют эксперименты, в которых видно, что взаимодействие электронов с остальными типами фононов все же присутствует. В частности, это измерения по магнитофононному резонансу, который имеет место, когда разница энергий между уровнями Ландау кратно энергии фонона [14]. Полный запрет переходов имеет место только тогда, когда переход происходит между точками зоны Бриллюэна, лежащими на осях, направленных точно вдоль определенных кристаллографических направлений, что никогда не выполняется в реальных условиях. Более того, связанные с симметрией запреты междолинных переходов в нулевом приближении, часто игнорируются, и при вычислениях междолинных деформационных потенциалов считают, что они не зависят от волнового вектора фонона (напр. [10]). В этом случае вычисляемые величины на самом деле являются лишь неким средним значением истинных деформационных потенциалов, однако такой подход приводит к хорошему согласию с результатами измерений. В работе [15] междолинные деформационные потенциалы вычисляются из первых принципов. Авторы используют самосогласованный псевдопотенциальный расчет методом функционала плотности в базисе плоских волн возмущения, создаваемого фононом с произвольным значением волнового вектора (DFPT). Расчет выполнялся для TA- $f$  и LA- $g$  фононов, междолинные переходы при взаимодействии с которыми в нулевом порядке запрещены. Полученные зависимости междолинного деформационного потенциала от волнового вектора фонона довольно сложны и они обращаются в ноль в определенных направлениях обратного пространства. Приве-

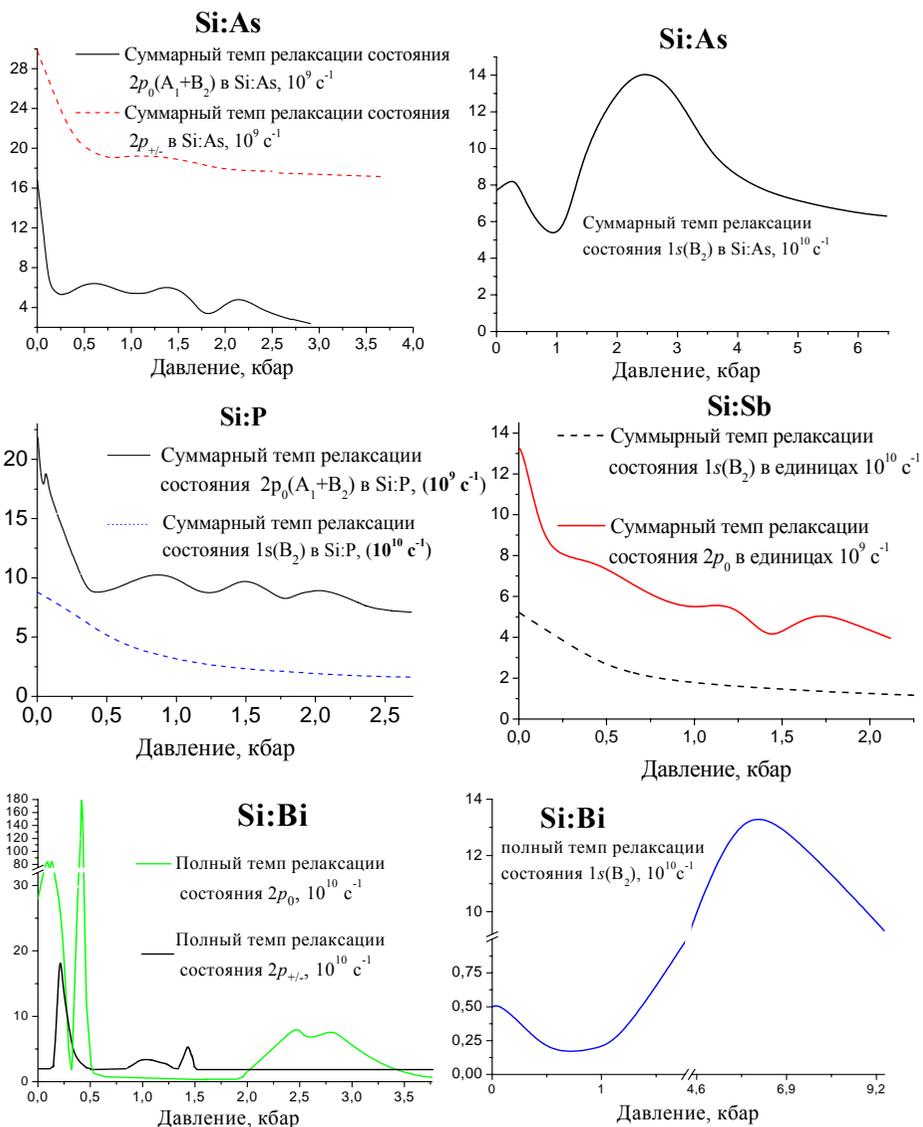
денные авторами результаты расчета, несомненно, важны, Однако они предполагают идеальность кристалла кремния, а внедрение в этот кристалл примесного центра приводит к локальному нарушению симметрии решетки и, по нашему мнению, снимает симметричные запреты, о которых идет речь. В настоящей работе использовались деформационные потенциалы, не зависящие от волнового вектора фонона, данные в [10,16], хорошо описывающие перенос электронов в объемном кремнии

Следует отметить, что расчеты, подобные тем, что представлены в данной диссертационной работе, проводились и ранее [17], но они относились лишь к состояниям донора фосфора в недеформированном кремнии, и процессы рассеяния  $f$ -типа при расчетах времен релаксации не учитывались.

**Вторая глава** посвящена расчету темпов низкотемпературной междолинной релаксации возбужденных состояний мелких доноров (фосфор, сурьма, мышьяк, висмут) при излучении междолинных фононов  $f$  и  $g$  типа в недеформированном кремнии. Рассматриваются состояния рабочего перехода стимулированного ТГц излучения, а так же те состояния, которые определяют маршрут релаксации и тем самым также оказывают влияние на населенность рабочих состояний при возбуждении донорных центров. Расчет показывает, что междолинные процессы электрон-фононного взаимодействия преобладают над внутримолинными и определяют времена жизни рабочих состояний лазера на мелких донорах в кремнии. Показано, что химический сдвиг состояний  $1s(E, T_2)$  приводит к сильной немонотонной зависимости темпа релаксации состояния  $2p_0$  для доноров в кремнии при взаимодействии с акустическими  $f$  и  $g$  фононами.

**В третьей главе** рассматривается релаксация состояний мелких доноров (P, Bi, Sb, As) в кремнии при взаимодействии с различными типами фононов в зависимости от одноосной деформации сжатия кристалла в направлении (100). Деформация приводит к сдвигу по энергии долин кремния, а, следовательно, к расщеплению и энергетическим сдвигам состояний примесных центров [18, 19]. Это, в свою очередь, приводит к изменению роли тех или иных фононов в процессе релаксации возбужденных доноров. При этом многое зависит от потенциала центральной ячейки, который приводит к так называемому химическому сдвигу  $1s$ -состояний. Зависимости от деформации полных темпов релаксации при взаимодействии с различными фононами состояний рассматриваемых в работе для мелких

доноров фосфора, сурьмы, мышьяка и висмута в кремнии представлены на рисунках.



Зависимости темпов релаксации состояний доноров V группы в кремнии при взаимодействии с фононами от давления, приложенного в направлении (100)

**Четвертая глава** посвящена сопоставлению результатов расчета с различными экспериментальными данными:

- сравнение с Pump-probe измерениями времен жизни возбужденных состояний доноров фосфора и мышьяка в кремнии;

- сравнение с данными спектральных измерений ширины линии поглощения на переходе в состояние  $2p_0$  донора фосфора в натуральном и моноизотопном кремнии ( $\text{Si}^{28}$ )

- сравнение с измерениями характеристик стимулированного излучения (интенсивность излучения, порог накачки) в зависимости от приложенного к образцу давления в кристаллографическом направлении (100). На основе вычисленных темпов переходов между состояниями доноров при взаимодействии с различными фононами в рамках упрощенной системы балансных уравнений рассчитана инверсия населенностей на рабочем переходе при различных значениях приложенного давления. Полученная зависимость сопоставлялась с экспериментальными данными.

В донорах фосфора и сурьмы деформация вдоль направления (100) приводит к «выключению» участия  $f$ -фононов в релаксации состояния  $2p_0$ , которое является верхним рабочим уровнем при генерации стимулированного излучения. В кремнии, легированном мышьяком, в отсутствие деформации верхним уровнем является состояние  $2p_{\pm}$ . Приложенное давление так же приводит к уменьшению вероятности  $f$ -переходов из состояния  $2p_{\pm}$  сразу в основное состояние  $1s(A_1)$ , что приводит к большему заселению состояния  $2p_0$ , и последнее становится верхним рабочим состоянием. Таким образом, изменение темпов переходов между состояниями доноров мышьяка при взаимодействии с фононами в деформированном кремнии приводит к переключению частоты лазерного излучения. Для всех перечисленных доноров одноосная деформация приводит к увеличению времени жизни верхнего рабочего состояния, а, следовательно, к уменьшению порога генерации.

В донорах висмута в отсутствие деформации при накачке  $\text{CO}_2$ -лазером генерация происходит на переходе  $2p_{\pm} - 1s(T_2)$  [20]. Состояние  $2p_0$  не является верхним уровнем рабочего перехода по той причине, что оно быстро релаксирует с излучением  $TO-f$  фононов. При давлении  $\sim 100$  бар переход  $2p_{\pm} - 1s(A_1')$  вступает в резонанс с  $LO-g$  фононами, что приводит к провалу на зависимости мощности лазерного излучения от приложенной деформации. Далее при увеличении давления до 1 кбар наступает резонанс перехода  $2p_{\pm} - 1s(A_1')$  с  $TO-f$

фононами, которые, согласно расчетам, эффективно оголяют состояние  $2p_{\pm}$  и при давлениях от 1 до 1,5 кбар генерация отсутствует. При давлениях свыше 1,5 кбар резонансное взаимодействие с оптическими фононами «выключается» и фотовозбужденные носители из состояния  $2p_{\pm}$  эффективно переходят в состояние  $2p_0$ , которое при таких давлениях уже не взаимодействует с  $TO-f$  фононами. В результате верхним состоянием рабочего перехода становится состояние  $2p_0$ , и стимулированный процесс излучения развивается на переходе  $2p_0-1s(B2)$ .

Описанные процессы изменения темпов междолинных переходов и каналов релаксации при одноосной деформации кристалла хорошо описывает все особенности экспериментальных кривых.

### Заключение

В заключении приведены основные результаты работы:

1. Проведены теоретические расчеты и дана сравнительная оценка времен низкотемпературного распада состояний доноров V группы в кремнии (сурьма, мышьяк, висмут), которые определяют стимулированное излучение указанных центров замещения при их оптическом возбуждении. Показано, что доминирующим механизмом такого распада является междолинное рассеяние связанных электронов, сопровождаемое излучением фононов.

2. Показано, что  $f$ -процессы электрон-фононного взаимодействия дают значительный вклад в общий темп релаксации состояний мелких доноров в кремнии. Во многих случаях взаимодействие с междолинными  $f$ -фононами является определяющим в релаксации возбужденных состояний доноров.

3. Показано, что химический сдвиг энергии основного состояния, связанный с потенциалом центральной ячейки, определяет тип фононов ответственных за распад состояний  $1s(E, T_2)$ , являющихся нижними состояниями рабочего перехода лазера на мелких донорах в недеформированном кремнии.

4. Показано, что энергетический сдвиг  $1s(E, T_2)$  – состояний, обусловленного влиянием потенциала центральной ячейки, ведет к сильному отличию скоростей релаксации состояния  $2p_0$  доноров V группы в кремнии при излучении  $TA-f$  и  $LA-g$  фононов.

5. Получены теоретические зависимости темпов низкотемпературной релаксации возбужденных состояний доноров V группы в кремнии от одноосной деформации сжатия кристалла в кристаллографическом направлении  $\{100\}$ . Показано, каким образом и почему

связанное с деформацией смещение долин зоны проводимости и соответствующее изменение энергий и волновых функций связанных состояний электронов изменяет внутрицентровые процессы распада возбужденных состояний мелких доноров.

6. Полученные данные расчетов по временам распада возбужденных состояний доноров позволили дать количественную оценку населенностей состояний рабочих переходов в кремниевом лазере на донорах V группы и объяснить большинство наблюдаемых особенностей в экспериментальных зависимостях частоты и интенсивности стимулированного излучения от деформации кристалла.

### Список цитированной литературы:

[1] М.С. Мурашов. О временных задержках генерации излучения в лазерных диодах на основе халькогенидов свинца. // М.С. Мурашов, А.П. Шотов. // Квантовая электроника. – 1995. Т.22, №12. – С. 1255-1256.

[2] V.I. Gavrilenko. Negative mass cyclotron resonance maser / V.I. Gavrilenko and Z.F. Krasil'nik. // Optical and Quantum Electronics – 1991. V.23. – S323-S329.

[3] 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(2) – С.69-71.

[4] L.E. Vorobjev. Generation of far-infrared radiation by hot holes in germanium and silicon in  $E \perp H$  fields. / L.E. Vorobjev, S.N. Danilov, V.I. Stafeev. // Optical and Quantum Electronics – 1991. V.23. – P221-229.

[5] Yu. P. Gousev. Widely tunable continuous-wave THz laser. / Yu. P., Gousev. I. V., Altukhov, K. A. Korolev, V. P. Sinis, and M. S. Kagan. // Applied Physics Letters – 1999. V. 75. – P.757-759.

[6] 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. V. 417. – P. 156–159.

[7] Rochat, M. Low-threshold terahertz quantum-cascade lasers. / Rochat, M., Ajili, L., Willenberg, H., Faist, J., Beere, H., Davies, G., Linfield, E., and Ritchie, D. // Applied Physics Letters – 2002. V. 81. – P. 1381–1383.

[8] Dargys A. Handbook on Physical Properties of Ge, Si, GaAs and InP / Dargys A. and J. Kundrotas. // Science and Encyclopedia Publishers – Vilnius – 1994. – 187 p.

[9] M. Ikezawa. Far-infrared absorption due to the two-phonon difference process in Si. / M. Ikezawa and M. Ishigame. // Journal of Physical Society of Japan. – 1981. V. 50. – P. 3734-3738.

[10] Jacoboni, C. The Monte Carlo method for the solution of charge transport in semiconductors with applications to covalent materials/ C. Jacoboni, L. Reggiani// Rev. Mod. Phys.– 1983.– v. **55** (3).– P. 645

[11] Ю, П. Основы физики полупроводников / Ю П., Кардона М.// Физматлит, М. 2002. 560 С.

[12] Lax, M. Selection rules connecting different points in the Brillouin zone/ M. Lax, J.J. Hopfield// Phys. Rev.– 1961.– v.**124**.– P. 115

[13] Birman, J.L. Intervalley-Scattering Selection Rules in III-V Semiconductors/ J.L.Birman, M. Lax, R. London// Phys.Rev.– 1966.– v.145.– P. 620

[14] Portal, J.C. A study of intervalley scattering in n-Si by the magnetophonon effect/ J.C. Portal, L. Eaves, S. Askenazy, R.A. Stradling// Solid State Communications.– 1974.– v.14, Issue 11.– P. 1241-1245

[15] Tyuterev, V. Theoretical intrinsic lifetime limit of shallow donor states in silicon / V. Tyuterev, J. Sjakste, N. Vast // Phys. Rev. B – 2010.– v. 81.– 245212

[16] Brunetti, R. Diffusion coefficient of electrons in silicon/ R. Brunetti, C. Jacoboni, F. Nava, L. Reggiani// J. Appl. Phys.– 1981.– v. **52**.– P. 6713

[17] Orlova, E.E. Longliving shallow donor states in silicon-life time calculation // 26<sup>th</sup> international conference on physics of semiconductors: 29 july-2 august, 2002, Cambridge, Great Britain, in J.H. Davies and A.R. Long (eds), Publisher: Institute of Physics Publishing ISBN: – 7503 - 0924 - 5, Conference Proceeding. – V. 3. – P. 123.

[18] Wilson, D.K. Electron spin resonance experiments on donor in silicon. III. Investigation of excited states by the application of uniaxial stress and their importance in relaxation processes/ D.K.Wilson, G.Feher// Phys.Rev.– 1961.– v. **124**(4).– P. 1068

[19] Бир, Г.Л. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках/ Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус// Наука, М. 1972.– 584 С.

[20] 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, H.// Appl. Phys. Lett.– 2007.– v. **90**.– P. 141109

#### **Основные публикации автора по теме диссертации**

[A1] Цыпленков, В.В. Междолинная релаксация возбужденных донорных состояний на оптических фонах в кремнии/ Цыпленков В.В., Демидов Е.В., Ковалевский К.А., Шагин В.Н.// Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И.Лобачевского.– 2006.– серия Радиофизика, Выпуск 1(3).– С.13

[A2] 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)

[A3] 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. Böttger, H.-W. Hübers, H. Riemann, N. V. Abrosimov, and N. Nötzel// Appl. Phys. Lett.–2007.– v.90.– P. 051101-(1-3)

[A4] Цыпленков, В.В. Релаксация возбужденных состояний доноров в кремнии с излучением междолинных фононов/ Цыпленков В.В., Ковалевский К.А., Шагин В.Н.// Физика и техника полупроводников.- 2008,– том 42, вып. 9.– С. 1032

[A5] Цыпленков, В.В. Влияние одноосной деформации на релаксацию возбужденных состояний мелких доноров в кремнии при взаимодействии с междолинными фонами/ Цыпленков В.В., Ковалевский К.А., Шагин В.Н.// Физика и техника полупроводников.– 2009.– том 43, вып. 11, С.1450

[A6] Pavlov, Sergey G Optimizing the Operation of Terahertz Silicon Lasers/ Sergey G. Pavlov, Heinz-Wilhelm Hübers, Ute Böttger, 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

[A7] 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. of Physics: Conference Series.– 2009.– v.193, № 012086.– P.1-4

[A8] Ковалевский, К.А Расчет вероятностей переходов между нижними возбужденными состояниями мелких примесных центров Р и В в кремнии/ Ковалевский К.А., Цыпленков В.В.// тезисы науч-

ной конференции по радиофизике, 7 мая 2003 г., Н.Новгород: ННГУ.– С. 86.

[A9] Ковалевский, К.А. Время жизни возбужденных примесных состояний в условиях резонансного взаимодействия с оптическими фононами/ Ковалевский К.А., Цыпленков В.В.// тезисы научной конференции по радиофизике, 7 мая 2003 г., Н.Новгород: ННГУ.– С. 66.

[A10] Цыпленков, В.В., Время жизни возбужденного состояния  $2p_0$  донора  $Bi$  в кремнии в условиях резонансного взаимодействия с оптическими фононами// тезисы пятой Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 1-5 декабря 2003 г., СПб.: СПбГПУ.– С. 90

[A11] Жукавин, Р.Х. Влияние одноосной деформации на стимулированное излучение доноров в кремнии при оптическом возбуждении/ Р.Х.Жукавин, В.Н.Шагин, С.Г.Павлов, Н.А.Бекин, В.В. Цыпленков, Н.-W.Hubers, Н.Riemann, Н.А.Абросимов// тезисы XII Российской конференции по физике полупроводников, 2005, М.: Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН.– С.350

[A12] Цыпленков, В.В. Междолинная релаксация возбужденных донорных состояний на оптических фононах в кремнии, тезисы к седьмой всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике// 1-5 декабря 2005 г., СПб.: СПбГПУ.– С. 63

[A13] Shastin, V.N. THz silicon laser based on arsenic donor transitions/ V.N. Shastin, R.H. Zhukavin, E.V. Demidov, S.G. Pavlov, V.V. Tsyplenkov, H.-W. Hubers, J.N. Hovenier, T.O.Klaasen// 28th international conference of the physics of Semiconductors, July 24-28, Vienna, Austria, 2006.– Abstract ID FrM2g.28

[A14] Демидов, Е.В. Переходы между уровнями донорного центра в Si со спонтанным излучением длинноволновых акустических фононов/ Е.В.Демидов, М.С.Кузнецов, Цыпленков В.В., В.Н.Шагин// Материалы X Симпозиума по нанозфизике и наноэлектронике, 13-17 марта 2006г. Н.Новгород: ИФМ РАН, 2006, том 2.– С. 320

[A15] Цыпленков, В.В. Расчет скоростей релаксации возбужденных состояний мелких доноров кремния при взаимодействии с междолинными фононами/ Цыпленков В.В., Шагин В.В.// тезисы VIII Всероссийской молодежной конференции по физике полупроводников и полупроводниковой опто- и наноэлектронике, 4-8 декабря 2006г, СПб.: СПбГПУ.– С. 113

[A16] Zhukavin, R.Kh. Silicon THz Lasers Performance Under Uniaxial Stress/ R.Kh. Zhukavin, S.G. Pavlov, H.-W. Hübers, 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

[A17] 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 12<sup>th</sup> Int. Conf. on Phonon scattering in condensed matter, Conservatoire National des Arts et Metiers, Paris, 15-20 July 2007. – P. 132-133

[A18] 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

[A19] Shastin, Valery N THz amplification based on impurity-band transitions in Si/GeSi heterostructures/ Valery N.Shastin, Roman Kh.Zhukavin, Nikolay A.Bekin, Veniamin V.Tsyplenkov, Henry H.Radomson, Sergey G.Pavlov, Heinz-Wilhelm Hubers // CAOL 2008: 4th International Conference on Advanced Optoelectronics and lasers, 2008, Alushta, Crimea, Ukraine, IEEE Catalog No CFP08814-PRT.– P.422-424

[A20] Цыпленков, В.В Междолинная релаксация на фононах возбужденных состояний мелких доноров в деформированном кремнии/ Цыпленков В.В., Шагин В.Н.// Всероссийский семинар по терагерцовой оптике и спектроскопии.– Санкт-Петербург, 20-24 октября 2008.– С.314

[A21] Шагин, В.Н. Усиление терагерцового излучения на примесно-зонных оптических переходах в селективно-легированных гетероструктурах Si/GeSi N-типа/ Шагин В.Н., Жукавин Р.Х., Бекин Н.А., Цыпленков В.В., Radamson Н.Н.,Pavlov S.G., Hübers Н.-W// Всероссийский семинар по терагерцовой оптике и спектроскопии.– Санкт-Петербург, 20-24 октября 2008.– С.319

[A22] Шагин, В.Н. Терагерцовое стимулированное излучение мелких доноров в SiGe/Si гетероструктурах/ В.Н. Шагин, Р.Х.

Жукавин, Н.А. Бенкин, В.В. Цыпленков, S.G.Pavlov, H.-W. Huebers// Материалы XII международного симпозиума «Нанопизика и нанозлектроника», Нижний Новгород, 2008 г.: ИФМ РАН.– С. 364

[A23] 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. Hübers// Optoelectronics and Nanostructures: 16th International conference on Electron Dynamics in Semiconductors, Montpellier, France, August 23-28, 2009.– P. 173

[A24] Цыпленков, В.В., Релаксация состояний мелких доноров в деформированном кремнии при взаимодействии с междолинными фононами/ В.В. Цыпленков, В.Н. Шастин// IX Российская конференция по физике полупроводников, Новосибирск-Томск, 28 сентября - 3 октября 2009 г.– С.239

[A25] 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, Turunç-Marmaris, Turkey.– P.85.

[A26] 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. Hübers// Труды II симпозиума по когерентному оптическому излучению полупроводниковых соединений и структур: М.: ФИАН, 2010.– С.49-58

Цыпленков Вениамин Владимирович

**РЕЛАКСАЦИЯ РАБОЧИХ СОСТОЯНИЙ В ЛАЗЕРЕ  
НА ВНУТРИЦЕНТРОВЫХ ПЕРЕХОДАХ ДОНОРОВ  
V ГРУППЫ В КРЕМНИИ ПРИ ИЗЛУЧЕНИИ ФОНОНОВ**

Автореферат

Подписано к печати 28 октября 2010 г. Тираж 100 экз.  
Отпечатано на ризографе в Институте физики микроструктур РАН  
603950, г. Нижний Новгород, ГСП-105