

## Лазеры на мелких донорах в одноосно-деформированном кремнии

© К.А. Ковалевский<sup>¶</sup>, Р.Х. Жукавин, В.В. Цыпленков, В.Н. Шагин, Н.В. Абросимов\*,  
Г. Рима<sup>\*</sup>, С.Г. Павлов<sup>+</sup>, Г.-В. Хьюберс<sup>+</sup>

Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\* Институт роста кристаллов им. Лейбница,  
12489 Берлин, Германия

<sup>+</sup> Институт исследования планет, DLR,  
12489 Берлин, Германия

(Получена 17 июля 2012 г. Принята к печати 17 июля 2012 г.)

Представлены результаты экспериментальных исследований эффектов терагерцового стимулированного излучения доноров V группы (фосфор, сурьма, мышьяк, висмут) в одноосно-деформированном кремнии при их оптическом возбуждении излучением CO<sub>2</sub>-лазера. Показано, что одноосная деформация сжатия кристалла в направлении [100] увеличивает коэффициент усиления и эффективность стимулированного излучения, значительно снижая пороговую интенсивность накачки. Измерены частоты и идентифицированы рабочие переходы доноров в деформированном кремнии. Дается теоретическая оценка зависимости разностной населенности рабочих состояний доноров от одноосной деформации сжатия в кристаллографическом направлении [100].

### 1. Введение

Первое обсуждение возможности генерации длинно-волнового инфракрасного (ИК) излучения на внутри-центровых переходах доноров и акцепторов в кремнии было опубликовано в работе [1], и вскоре это нашло экспериментальное подтверждение [2]. Эффект стимулированного излучения доноров фосфора (P) в охлаждаемом жидким гелием кремнии был получен при возбуждении излучением TEA-CO<sub>2</sub>-лазера. Позже такой эффект был обнаружен и на других донорах V группы (сурьма Sb, мышьяк As, висмут Bi) [3,4]. Исследование излучения указанных центров замещения при их внутрицентровом оптическом возбуждении также вызвало определенный интерес. В экспериментах с использованием лазера на свободных электронах (FELIX) был получен ряд особенностей, связанных с зависимостью линий/частот генерации от энергии кванта накачки, и обнаружен эффект вынужденного комбинационного рассеяния излучения накачки (Raman lasing) с излучением компоненты Стокса [5–9]. Проведенные на недеформированном кремнии измерения позволили идентифицировать рабочие состояния (переходы), установить оптимальные концентрации легирования,  $\sim (2-4) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , и возможные значения коэффициента усиления, до  $0.2 \text{ см}^{-1}$  (накачка TEA-CO<sub>2</sub>) и до  $\sim 2 \text{ см}^{-1}$  (FELIX), определить предельные рабочие температуры (15–30 К) и пороговые значения накачки ( $30-100 \text{ кВт/см}^2$ ), оценить темпы распада наиболее важных состояний и т.д. [10,11]. В данной публикации дается краткий обзор исследования эффектов стимулированного излучения доноров V группы в кремнии, возбуждаемых излучением CO<sub>2</sub>-лазера при одноосной деформации сжатия кристалла.

Как известно, кремний имеет 6 эквивалентных долин зоны проводимости и в приближении эффективной

массы каждое состояние в поле кулоновского центра (донора) как минимум шестикратно вырождено. Однако короткодействующий потенциал, связанный с внедрением этого центра в решетку кристалла, снимает вырождение состояний s-типа. В наибольшей степени это касается мультиплета 1s. Уровень 1s расщепляется на три: синглет 1s(A<sub>1</sub>), дублет 1s(E) и триплет 1s(T<sub>2</sub>). Обозначения A<sub>1</sub>, E, T<sub>2</sub> соответствуют обозначениям неприводимых представлений точечной симметрии тетраэдра и отражают симметрию состояния. При этом на энергию основного состояния 1s(A<sub>1</sub>) сильно влияет то, какой донор замещает атом решетки кремния. Величина соответствующей поправки долин-орбитального (VO) взаимодействия  $\Delta$  („химический сдвиг“) может достигать 25–100% того значения энергии связи водородоподобного состояния 1s ( $\sim 31 \text{ мэВ}$ ), которое получается в приближении эффективной массы. Помимо этого, спин-орбитальное (SO) взаимодействие расщепляет триплет 1s(T<sub>2</sub>). Наибольшее значение SO-расщепления наблюдается на доноре Bi ( $\Lambda_{SO} \approx 0.71 \text{ мэВ}$ ), несколько меньшее на Sb ( $\Lambda_{SO} = 0.29 \text{ мэВ}$ ), и оно пренебрежимо мало на донорах P и As. Спектр энергии состояний непосредственно влияет как на кинетику неравновесных состояний, так и на характеристики стимулированного излучения. Одноосная деформация сдвигает долины зоны проводимости, и состояния доноров претерпевают изменения. По этой причине должны изменяться и все характеристики стимулированного излучения доноров. На рис. 1 и 2 показана зависимость энергий состояний электронов от одноосного сжатия кристалла вдоль осей [100] и [110] в Si:Bi и Si:P соответственно. Слева вдоль оси энергии отмечены наиболее важные состояния, исключением является состояние 1s(B<sub>2</sub>), указанное внутри рис. 2. Чтобы не загромождать рисунки, состояние 2s, расположенное между 2p<sub>0</sub> и 2p<sub>±</sub>, не обозначено. Это состояние играет достаточно важную роль в процессе релаксации доноров и влияет на населенность рабочих состояний, участвующих в излучении.

<sup>¶</sup> E-mail: atan4@yandex.ru

Верхние индексы в символах, обозначающих связанные состояния донора ( $2\Delta$ ,  $4\Delta$ ), показывают долины, с которыми они связаны. Долины ( $2\Delta$ ,  $4\Delta$ ) расходятся линейно с деформацией, что и определяет точно такой же сдвиг  $\delta E$  „привязанных“ к ним верхних возбужденных состояний ( $2p_0$ ,  $2s$ ,  $2p_{\pm}$ ...). Для состояний группы  $1s$  в круглых скобках показаны часто используемые обозначения симметрии [12]. При этом зависимость энергии состояний  $1s$  от деформации отклоняется от линейной. Видно, что как VO-, так и SO-взаимодействие в доноре Bi существенно меняет спектр энергий состояний. При этом первое оказывает значительное влияние для деформаций с  $\delta E < \Delta$ , а второе важно при  $\delta E < \Lambda_{SO}$ . Подобную картину спектра состояний с поправкой на величину параметров  $\Lambda_{SO}$  и  $\Delta$  имеет и донор Sb. В то же

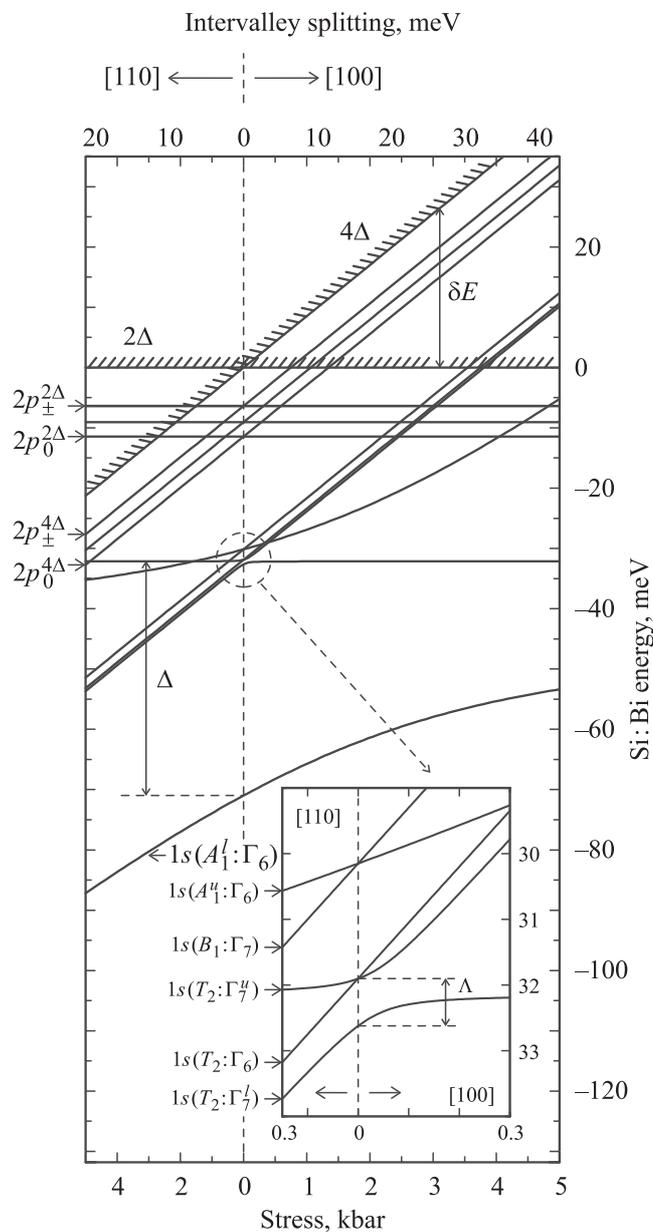


Рис. 1. Схема уровней электронных состояний Si:Bi при одноосной деформации сжатия кристалла кремния.

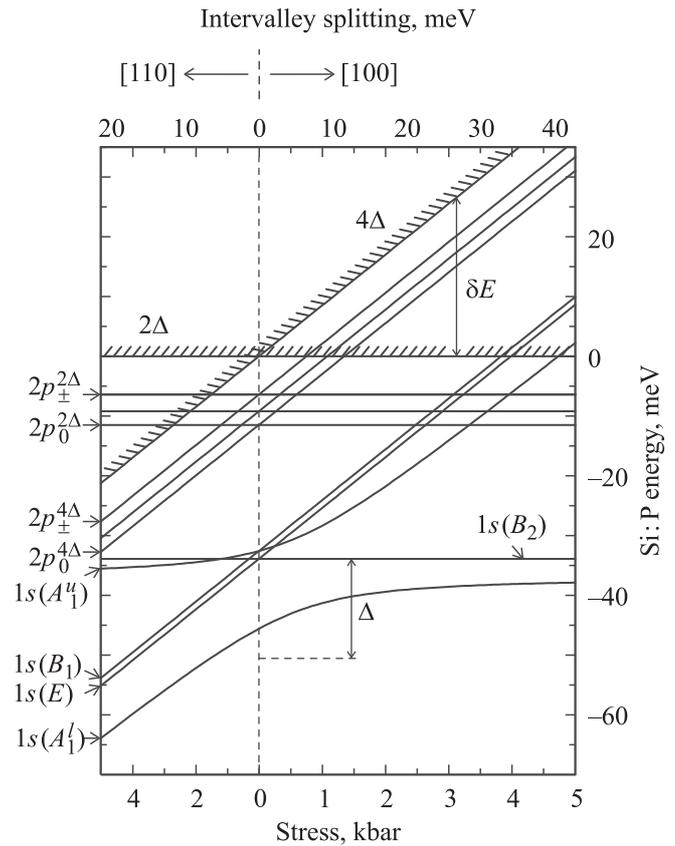


Рис. 2. Схема уровней электронных состояний Si:P при одноосной деформации сжатия кристалла кремния.

самое время в доноре P спин-орбитальное взаимодействие пренебрежимо мало и спектр состояний в области малых деформаций не усложняется. Спектр состояний для донора As повторяет такой спектр донора P с поправкой на большую величину „химического сдвига“.

## 2. Образцы и техника измерений

Кристаллы кремния были выращены методом зонной плавки и легированы донорами V группы с концентрацией  $N_D \approx (2-4) \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , остаточная концентрация акцепторов (бор) не превышала  $10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Образцы были изготовлены в форме прямоугольного параллелепипеда сечением  $(a \times b)$  и длиной  $h$ . Параметры образцов приведены в табл. 1. Грани образца ориентировались по кристаллографическим осям [100] и [110] и были обработаны так, чтобы образец представлял собой добротный резонатор излучения терагерцового диапазона частот на модах полного внутреннего отражения. Отклонения от параллельности граней составляли  $< 1'$ . По нашим оценкам, потери резонатора не превышали  $\sim 0.02 \text{ см}^{-1}$ . Выход терагерцового излучения осуществлялся благодаря как дифракции, так и отклонению противоположных граней от параллельности и потому имел широкую диаграмму направленности ( $> 90^\circ$ ).

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов

№ образца	Материал	Размеры ( $a \times b$ ) $\times h$ , мм	Направление деформации	$N_D$ , $10^{15} \text{ см}^{-3}$	Метод выращивания кристалла
#1	Si:P	$(1.9 \times 5.9) \times 6$	[110]	2	Метод Чохральского  Зонная плавка
#2	Si:P	$(2.7 \times 4.9) \times 6.9$	[100]	3.9	
#3	Si:Sb	$(4.9 \times 3.2) \times 6.5$	[100]	4	
#4	Si:Sb	$(2.7 \times 4.7) \times 6.2$	[110]	4	
#5	Si:As	$(1.9 \times 6.1) \times 4.1$	[100]	4	
#6	Si:As	$(1.9 \times 4) \times 6.1$	[110]	4.3	
#7	Si:Bi	$(2.6 \times 4.9) \times 6$	[100]	3	
#8	Si:Bi	$(2.6 \times 4.9) \times 7$	[110]	2.7	

Образец помещался в специальную вставку, позволяющую прикладывать давление до значений  $\sim (4-5)$  кбар. Вставка погружалась в криостат с жидким гелием (4.2 К). Давление прикладывалось вдоль длинной грани ( $h$ ) образца, который возбуждался излучением в диапазоне длин волн 9.6–10.6 мкм. При этом использовались как  $\text{CO}_2$ -лазер с поперечной накачкой (TEA- $\text{CO}_2$ -лазер, 9.6–10.6 мкм), так и  $\text{CO}_2$ -лазера с продольной накачкой в режиме модулированной добротности (QSW- $\text{CO}_2$ -лазер, 10.6 мкм). В случае TEA- $\text{CO}_2$ -лазера плотность мощности излучения составляла  $\sim 300 \text{ кВт/см}^2$  в импульсе длительностью  $\sim 100 \text{ нс}$ , а для QSW- $\text{CO}_2$ -лазера с продольной накачкой соответствующие параметры были  $\sim 4 \text{ кВт/см}^2$  и  $\sim 300 \text{ нс}$ . Поляризация поля волны накачки была направлена по оси деформации кристалла, а мощность накачки регулировалась с помощью аттенюатора. Оптическая схема измерений представлена в работе [13]. Стимулированное излучение регистрировалось Ge:Ga-фотоприемником ИК излучения (концентрация Ga  $N_{\text{Ga}} \approx 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ). Для отсеки рассеянного излучения накачки использовался сапфировый фильтр. Спектральные измерения проводились на фурье-спектрометре с разрешением  $\sim 0.2 \text{ см}^{-1}$ .

### 3. Эффективность излучения и порог накачки

Эксперименты на одноосно-сжатом кремнии, легированном донорами P, Sb, As и Bi, показали, что одноосная деформация по оси [100] приводит к значительному увеличению эффективности стимулированного излучения и уменьшает пороговую интенсивность накачки (рис. 3). Однако при деформации по оси [110] все не так однозначно. Для доноров P и Sb подобное положительное влияние одноосной деформации кристалла, хотя и при больших давлениях, действительно имеет место для обоих кристаллографических направлений. В то же время для доноров As положительный эффект деформации [110] сравнительно мал, а для Bi он, как выяснилось, эффект даже отрицательный, т. е. приводит к уменьшению интенсивности выходного излучения. Чтобы ограничить объем статьи, мы не приводим данные измерений зависимости интенсивности стимулирован-

ного излучения и порога накачки от деформации в направлении [110].

На рис. 3 и 4 показаны зависимости выходной интенсивности излучения доноров V группы в кремнии от деформации сжатия [100] кристалла. Измерения выполнялись на QSW- $\text{CO}_2$ -лазере с продольной накачкой (10.6 мкм,  $\sim 4 \text{ кВт/см}^2$ ). Заметим, что величины выходного сигнала для различных доноров на рис. 3 и 4 даются в относительных единицах и не отражают соотношения мощностей выходного излучения для разных центров. Однако зависимости выходной мощности стимулированного излучения от деформации и интенсивности накачки отражены в полной мере. Видно, что величина оптимальной деформации зависит от типа донора, и она существенно различается для P, Sb, с одной стороны, и As, Bi — с другой. Это же можно сказать и про характер наблюдаемых зависимостей. Так, для Si:P наблюдается рост интенсивности стимулированного излучения с ростом прикладываемого давления до значения  $S \approx 0.75$  кбар, после которого следует падение эффективности излучения. Генерация пропадает при  $S > 2.5$  кбар. В Si:Sb при тех же плотностях мощ-

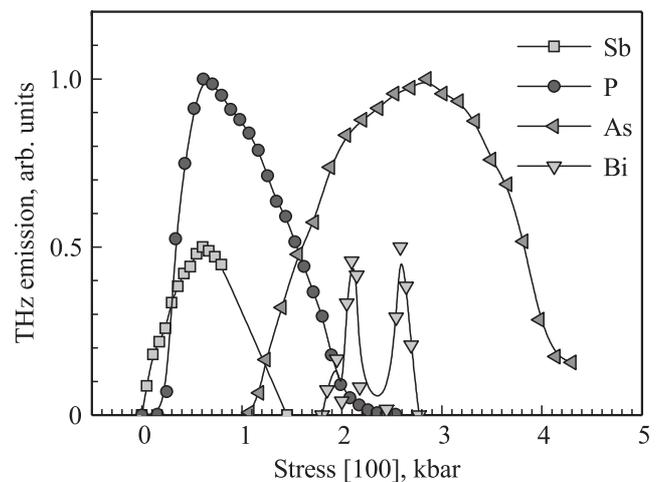
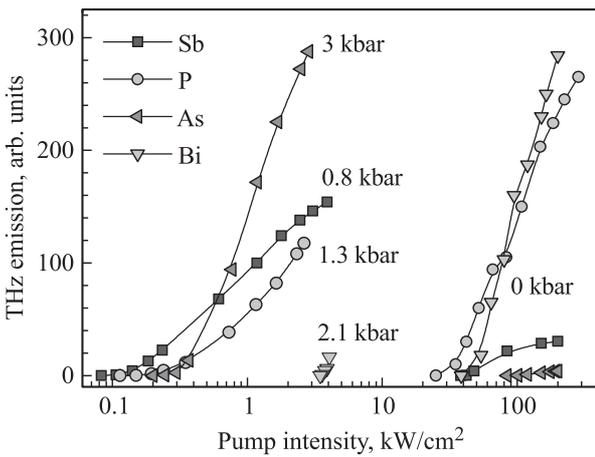


Рис. 3. Зависимости выходной интенсивности стимулированного терагерцового излучения от величины деформации сжатия при накачке QSW- $\text{CO}_2$ -лазером: 10.6 мкм,  $\sim 4 \text{ кВт/см}^2$ . Сигналы масштабированы произвольно.



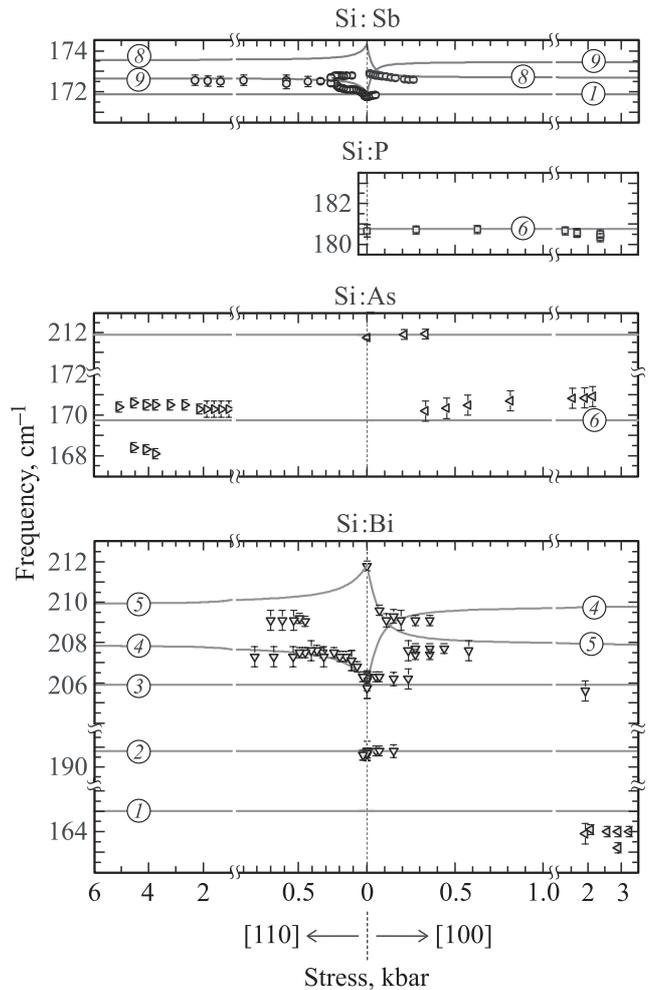
**Рис. 4.** Зависимости выходной интенсивности стимулированного тетрагерцового излучения от величины накачки CO<sub>2</sub>-лазера (QSW и TEA) для различных деформаций сжатия [100]. Сигналы масштабированы произвольно.

ности накачки происходит рост выходного сигнала с давлением до  $S \approx 0.6$  кбар, а далее спад его до полного исчезновения при  $S > 1.5$  кбар. При том же направлении деформации на образцах Si:As эффект стимулированного излучения доноров As появляется лишь при  $S \approx 1$  кбар. Максимальное значение выходного сигнала достигается при  $S \approx 3$  кбар. При больших деформациях, с  $S = 3-3.5$  кбар, сигнал уменьшается, однако полностью генерация не исчезает. Отметим, что при большей интенсивности накачки падение выходного сигнала при  $S > 3$  кбар становится менее выраженным. Для Si:Bi при тех же условиях возбуждения стимулированное излучение появляется при давлениях  $S > 1.8$  кбар, и для  $S > 2.9$  кбар оно пропадает. Обращает на себя внимание более сложная зависимость от деформации, которая показывает провал эффекта излучения при  $S \approx 2.3$  кбар. Таким образом, Bi явно выделяется на фоне других доноров.

#### 4. Спектральные измерения

На рис. 5 приведены частоты наблюдаемых линий генерации для всех доноров V группы и отражена их зависимость от одноосной деформации сжатия для двух кристаллографических направлений — [100] и [110]. Теоретическая зависимость показана сплошными линиями и номером указан тип рабочего перехода (табл. 2). Частоты наблюдаемых линий генерации показаны точками.

В Si:Sb при деформации вдоль [100] имеются две линии генерации с частотами 171.8 и 174.2 см<sup>-1</sup>, соответствующие переходам  $2p_0^{2\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_7^l)$  и  $2p_0^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_6)$ . Состояние  $1s(T_2 : \Gamma_7^l)$  испытывает влияние спин-орбитального взаимодействия, и его энергия зависит от деформации в области ее малых величин (рис. 1). В результате наблюдается перестройка частоты излучения на переходе  $2p_0^{2\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_7^l)$ . Для



**Рис. 5.** Частоты излучения доноров V группы в кремнии при одноосной деформации сжатия кристалла. Сплошные линии — теоретические значения энергии переходов, представленных в табл. 2.

давления вдоль [110] частота генерации изменяется в диапазоне 171.8–172.5 см<sup>-1</sup> и связана с переходом из состояния  $2p_0^{4\Delta}$  в отщепленное спин-орбитальным взаимодействием состояние  $1s(T_2 : \Gamma_7^u)$ .

**Таблица 2.** Типы рабочих переходов, идентифицированные на основе спектральных измерений (рис. 5)

Номер перехода	Тип перехода
1	$2p_0^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_6)$
2	$2p_{\pm}^{4\Delta} \rightarrow 1s(B_1 : \Gamma_7)$
3	$2p_{\pm}^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_6)$
4	$2p_{\pm}^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_7^l)$
5	$2p_{\pm}^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_7^u)$
6	$2p_0^{2\Delta} \rightarrow 1s(B_2)$
7	$2p_{\pm}^{2\Delta} \rightarrow 1s(B_2)$
8	$2p_0^{2\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_7^l)$
9	$2p_{\pm}^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_7^u)$

В Si:Bi при малых деформациях [100], с  $S < 1$  кбар, рабочими переходами являются переходы  $2p_{\pm}^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_6)$ ,  $1s(B_1 : \Gamma_7)$ ,  $1s(T_2 : \Gamma_7^y)$  и  $2p_{\pm}^{2\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_7^l)$ , в которых верхними состояниями являются состояния  $2p_{\pm}$ . Для переходов в состояния  $1s(T_2 : \Gamma_7^l)$ ,  $1s(T_2 : \Gamma_7^y)$  для доноров Bi, так же как и для Sb, имеет место зависимость частот излучения от деформации, но количественно она выражена более сильно по причине большей энергии спин-орбитального расщепления состояния  $1s(T_2)$  (рис. 1). При деформации [100] с давлением  $S \approx 1$  кбар происходит смена частоты стимулированного излучения. При  $S > 1$  кбар „новая“ частота равна  $164 \text{ см}^{-1}$  и она близка к частоте перехода  $2p_0^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_6)$  между состояниями верхних долин  $4\Delta$ .

Для доноров P и As в кремнии эффекты спин-орбитального взаимодействия, как известно, малы и в спектрах стимулированного излучения не наблюдаются. Генерация в Si:P происходит на частоте  $180.7 \text{ см}^{-1}$  (рис. 5), не меняется при деформации кристалла и соответствует переходу из состояния  $2p_0$  нижних долин в возбужденное состояние  $1s(B_2)$  мультиплета  $1s$  [13].

В Si:As происходит переключение частот рабочих переходов при деформации сжатия  $\sim 0.3$  кбар вдоль [100] (рис. 5), что связано со сменой верхнего рабочего уровня с  $2p_{\pm}^{2\Delta}$  на  $2p_0^{2\Delta}$ . Переключение рабочих переходов вызвано подавлением в условиях деформации распада состояний  $2p_{\pm}$ ,  $2s$  в основное состояние  $1s(A_1)$  с излучением фонона LA- $f$ , энергия которого близка к  $47 \text{ мэВ}$ . В результате частота генерации переключается с  $211.9$  на  $171.2 \text{ см}^{-1}$  [14]. При деформации вдоль направления [110] генерация происходит на частоте  $171.2 \text{ см}^{-1}$  (переход  $2p_0^{2\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_7^l)$ ), которая не меняется во всем диапазоне измерений от 1 до 5 кбар.

## 5. Обсуждение

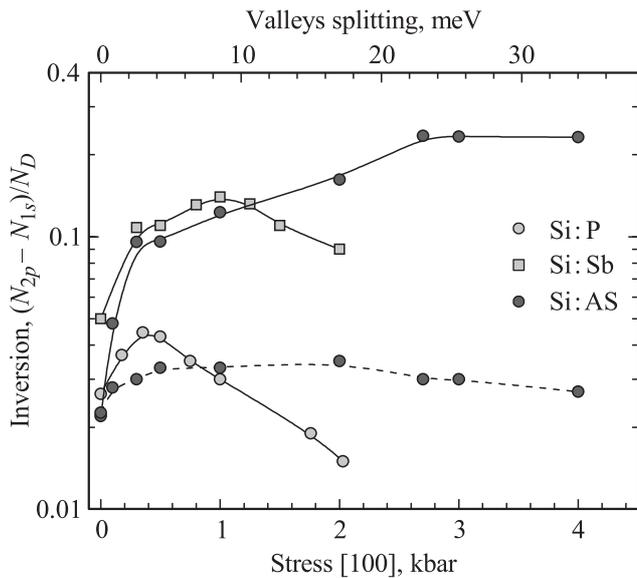
Наблюдаемые зависимости интенсивности и порога стимулированного излучения от прикладываемого к кристаллу кремния давления обусловлены деформационной зависимостью темпов релаксации возбужденных состояний доноров с излучением акустических фононов TA- $g$  ( $\sim 10 \text{ мэВ}$ ), LA- $g$  ( $\sim 20 \text{ мэВ}$ ), TA- $f$  ( $\sim 20 \text{ мэВ}$ ), LA- $f$  ( $\sim 47 \text{ мэВ}$ ), а также оптических фононов TO- $f$  ( $59 \text{ мэВ}$ ) и LO- $g$  ( $63 \text{ мэВ}$ ), ответственных за переходы между долинами зоны проводимости. При этом в релаксации донора Bi участвуют все из них, в случае As — все из отмеченных выше акустических, а в донорах P и Sb важны лишь TA- $g$ , LA- $g$  и TA- $f$ . При деформации происходит значительная перестройка всех доноров, при этом меняются не только энергии, но и волновые функции связанных состояний, включая их симметрию (рис. 1). Как следствие, процессы релаксации возбужденных состояний рассматриваемых центров претерпевают существенные изменения. Так, уже при малых деформациях (касается всех доноров) это выключает распад состояния  $2p_0$  (безызлучательный переход в

$1s(B_2)$ ) на фононах TA- $f$  и время жизни состояния  $2p_0$  увеличивается в 3–4 раза [11].

Наиболее простой случай связан с донорами фосфора и сурьмы. При давлениях [100]  $S > 1$  кбар для донора Sb и  $S > 1.5$  кбар для донора P выключается релаксация состояния  $1s(B_2)$  на фононах TA- $g$ . В результате инверсная заселенность рабочего перехода  $2p_0 \rightarrow 1s(B_2)$  падает и эффект усиления пропадает. Необходимо отметить, что в отличие от Si:P в Si:Sb при малых деформациях ( $S < 60$  бар) поправки, связанные со спин-орбитальным взаимодействием, приводят к генерации на переходах  $2p_0^{4\Delta} \rightarrow 1s(T_2 : \Gamma_6)$  верхних долин. Однако это отличие пропадает при больших деформациях кристалла.

Для донора As в недеформированном кремнии важную роль играет распад состояний  $2p_{\pm}$  и  $2s$  в  $1s(A_1)$  на фононах LA- $f$ . Этот процесс уменьшает населенность  $2p_{\pm}$  и препятствует возбуждению состояния центра  $2p_0$ . Однако опыт показывает, что при достаточно большом уровне накачки ( $\sim 100 \text{ кВт/см}^2$ ) генерация все же развивается на переходе  $2p_{\pm} \rightarrow 1s(T_2)$ . Однако уже при небольшой деформации вдоль оси [100],  $S > 0.6$  кбар, состояния  $2p_{\pm}$  и  $2s$  выходят из взаимодействия с фононами LA- $f$ , состояние  $2p_0$  эффективно возбуждается и переход  $2p_0 \rightarrow 1s(B_2)$  начинает доминировать в эффекте стимулированного излучения этого центра. Важно отметить, что, согласно нашим расчетам (см. рис. 3), для донора As проблемы быстрой релаксации нижнего состояния рабочего перехода не должно возникать как минимум до  $S \approx 6$  кбар, и наблюдаемое падение эффективности излучения, скорее всего, отражает уменьшение темпа фотоионизации доноров As с ростом деформации. В этом отношении стоит подчеркнуть, что значение деформации, приводящее к максимальному значению выходной интенсивности излучения, может отличаться от тех, которые дают наибольшие значения малосигнального коэффициента усиления, т.е. минимума порога накачки. Это легко понять, так как в первом случае развитие стимулированного излучения достигает нелинейной стадии, когда параметр насыщения такого процесса во многом контролируется темпом релаксации верхнего рабочего состояния. Для сравнения в линейном режиме коэффициент усиления определяется разницей населенностей верхних и нижних состояний, участвующих в процессе излучения.

Случай Si:Bi оказывается наиболее сложным для интерпретации. По данным спектральных измерений (рис. 5), в эффекте стимулированного излучения донора Bi доминируют переходы, связанные с состояниями верхних долин  $4\Delta$  зоны проводимости. Данное обстоятельство означает то, что для интерпретации эксперимента требуются расчеты темпов распада и населенностей большого числа состояний как верхних, так и нижних долин с учетом всех междолинных фононов. Теоретические выводы пока окончательно не сформулированы, однако ясно, что переходы, связанные с нижними долинами ( $2\Delta$  при  $S \parallel [100]$  или  $4\Delta$  при  $S \parallel [110]$ ), выключаются из процесса стимулированного



**Рис. 6.** Расчет инверсии населенностей в зависимости от величины деформации сжатия. Сплошная линия — переход  $2p_0 \rightarrow 1s(B_2)$ , штриховая —  $2p_{\pm} \rightarrow 1s(B_2)$ .

излучения по причине малого темпа релаксации нижнего состояния рабочего перехода. В рассматриваемых условиях ни один из междолинных фононов не может обеспечить распад нижнего рабочего состояния по причине значительного несовпадения энергии таких фононов и энергетического зазора между соответствующими состояниями центра. Ситуация может измениться при давлениях  $S > 5$  кбар (деформация по оси [100]), когда такой распад может происходить с излучением фононов, LA-g, но при  $S > 4$  кбар измерения пока не проводились.

Заметим, что для доноров фосфора, сурьмы и мышьяка в кремнии зависимости темпов междолинной релаксации от одноосной деформации сжатия в направлении [100] представлены в работе [15]. На рис. 6 показан результат теоретической оценки инверсии заселенности  $(N_{2p} - N_{1s})/N_D$  рабочих переходов доноров P, Sb и As в кремнии в зависимости от его деформации по оси [100] ( $N_{2p}$  — населенность верхнего,  $N_{1s}$  — населенность нижнего состояний рабочего перехода,  $N_D$  — полная концентрация доноров). Расчет проводился в рамках упрощенной модели каскадной релаксации с использованием системы балансных уравнений, а данные о темпах распада ключевых состояний были взяты из работы [15]. Считалось, что темп фотоионизации нейтральных доноров не зависит от деформации и составляет  $10^9 \text{ с}^{-1}$ . Заметим, что сечение фотоионизации зависит от энергии связи донора и находится в интервале  $(2-4) \cdot 10^{-16} \text{ см}^2$  [16]. Точность такой теоретической оценки абсолютных значений невысока, поскольку точное значение констант электрон-фононного взаимодействия с участием междолинных фононов неизвестно. Эти константы брались из работы [17] и, скорее всего, они завышают темп распада ключевых состояний в 2–3 раза. Такой вывод можно сделать, опираясь на

недавно полученные экспериментальные данные по времени распада состояния  $2p_0$  [18,19]. Однако зависимость от деформации (рис. 6) должна правильно отражать ситуацию. Следует заметить, что недостатком выбранной модели расчета является фиксированное значение темпа накачки. Такое предположение справедливо для деполяризованного излучения накачки, но не выполняется при выделенном направлении ее поляризации. Для имевшей место в измерениях поляризации поля накачки по оси [100] с увеличением деформации ( $S \parallel [100]$ ) должно иметь место падение сечения фотоионизации [20]. Такой эффект возникает по причине анизотропии эффективной массы и уменьшения вклада долин  $4\Delta$  в волновую функцию основного состояния донора. Заметим, что перестройка вкладов долин в формирование основного состояния практически заканчивается, когда энергия расщепления долин ( $\delta E$ ) превышает параметр „химического сдвига“  $\Delta$ . Для донора мышьяка  $\Delta \approx 20 \text{ мэВ}$ , и это происходит при давлениях  $S > 4$  кбар. Разумеется, подобное влияние должно несколько „поджать“ показанные на рис. 6 зависимости для доноров сурьмы и фосфора в полном соответствии с их параметрами такого сдвига.

Другим важным фактором, ответственным за резкое падение порога генерации с ростом деформации, является уменьшение поглощения стимулированного излучения отрицательно заряженными донорами. Такое поведение может быть связано как с уменьшением энергии связи, а следовательно, и концентрации таких центров с ростом деформации [21], так и с уменьшением их сечения поглощения для поляризации поля стимулированного излучения вдоль оси [100]. Уменьшение сечения поглощения связано с анизотропией эффективной массы электронов. Надежных количественных данных по подавлению поглощения на отрицательно заряженных донорах одноосной деформацией кристалла кремния пока нет, но по предварительным данным наших измерений такие потери можно уменьшить в 5–10 раз. Третьим фактором влияния одноосной деформации [100] является увеличение эффективности накачки рабочих ( $2\Delta$ ) долин. В недеформированном кремнии равно возбуждаются все шесть X-долин зоны проводимости, и сечение поглощения/усиления на тех или иных переходах (определяясь суперпозицией вкладов всех долин) не зависит от поляризации в силу кубической симметрии. Однако, если равномерное распределение электронов по долинам нарушается, а при одноосном сжатии кристалла в направлениях [100] и [110] именно так и происходит, то это отражается на сечениях внутрицентровых оптических переходов. Так, с ростом давления [100] большее число электронов переходит в выделенную деформацией кристалла пару долин. Нетрудно показать, что для стимулированного излучения на переходе  $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$  с поляризацией по оси деформации это может увеличить эффективное сечение усиления до 3 раз. Если вернуться к результатам измерений порога генерации, то только учет всех перечисленных выше факторов может объяснить наблюдаемое аномально большое уменьшение требуемой интенсивности оптической накачки.

## 6. Заключение

На основе проведенных экспериментальных исследований и теоретических оценок показано, что одноосное сжатие кристалла кремния существенно влияет на стимулированное излучение доноров V группы в кремнии на внутрицентровых переходах. Установлено, что деформацией сжатия по оси [100] можно добиться существенного увеличения эффективности стимулированного излучения и значительно, на 2 порядка, снизить пороговую интенсивность накачки. Наблюдаемый выигрыш связан с тремя факторами: увеличением времен жизни верхних рабочих состояний, увеличением эффективности накачки долин  $2\Delta$  и уменьшением внутренних потерь, связанных с поглощением на отрицательно заряженных донорах. Проведены измерения спектральных характеристик стимулированного излучения доноров P, Sb, As, Bi в кремнии в зависимости от одноосной деформации сжатия кристалла по кристаллографическим направлениям [100] и [110]. Экспериментально исследовано влияние спин-орбитального взаимодействия на частоты стимулированного излучения доноров сурьмы и висмута в кремнии в зависимости от указанной деформации кристалла.

Работа поддержана фондом РФФИ (гранты № 11-02-00957-а, 11-02-97027р\_поволжье\_а).

## Список литературы

- [1] V.N. Shastin. *21st Int. Conf. Infrared and Millimeter Waves: Conf. Digest*, ed. by von Ortenberg, H.-U. Müller (Berlin, Germany, 1996) abstr. ID CT2.
- [2] S.G. Pavlov, R.Kh. Zhukavin, E.E. Orlova, V.N. Shastin, A.V. Kirsanov, H.-W. Hübers, K. Auen, H. Riemann. *Phys. Rev. Lett.*, **84**, 5220 (2000).
- [3] S.G. Pavlov, H.-W. Hübers, M.H. Rummeli, R.Kh. Zhukavin, E.E. Orlova, V.N. Shastin, H. Riemann. *Appl. Phys. Lett.*, **80**, 4717 (2002).
- [4] H.-W. Hübers, S.G. Pavlov, H. Riemann, N.V. Abrosimov, R.Kh. Zhukavin, V.N. Shastin. *Appl. Phys. Lett.*, **84**, 3600 (2004).
- [5] 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, V.N. Shastin. *Phys. Rev. Lett.*, **96**, 037404 (2006).
- [6] S.G. Pavlov, H.-W. Hübers, J.N. Hovenier, T.O. Klaassen, H. Riemann, N.V. Abrosimov, N. Notzel, R.Kh. Zhukavin, V.N. Shastin. *J. Luminesc.*, **121**, 304 (2006).
- [7] S.G. Pavlov, H.-W. Hübers, U. Böttger, R.Kh. Zhukavin, V.N. Shastin, J.N. Hovenier, B. Redlich, N.V. Abrosimov, H. Riemann. *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 091111 (2008).
- [8] 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, H.-W. Hübers. *Appl. Phys. Lett.*, **94**, 171112 (2009).
- [9] S.G. Pavlov, U. Böttger, R. Eichholz, N.V. Abrosimov, H. Riemann, V.N. Shastin, B. Redlich, H.-W. Hübers. *Appl. Phys. Lett.*, **95**, 201110 (2009).
- [10] В.В. Цыпленков, Е.В. Демидов, К.А. Ковалевский, В.Н. Шасти́н. *ФТП*, **42**, 1032 (2008).
- [11] В.В. Цыпленков, К.А. Ковалевский, В.Н. Шасти́н. *ФТП*, **43**, 1450 (2009).
- [12] A.J. Mayur, M. Dean Sciacca, A.K. Ramdas, S. Rodriguez. *Phys. Rev. B*, **48**, 10893 (1993).
- [13] 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, N. Nötzel. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 051101 (2007).
- [14] S.G. Pavlov, U. Böttger, H.-W. Hübers, R.Kh. Zhukavin, K.A. Kovalevsky, V.V. Tsyplenkov, V.N. Shastin, N.V. Abrosimov, H. Riemann. *Appl. Phys. Lett.*, **90**, 141109 (2007).
- [15] Цыпленков В.В. Автореф. канд. дис. (Н.Новгород, ИФМ РАН, 2010).
- [16] N. Sclar. *Progr. Quant. Electron.*, **9**, 149 (1984).
- [17] C. Jacoboni, L. Reggiani. *Rev. Mod. Phys.*, **55** (3), 645 (1983).
- [18] В.Н. Шасти́н, Р.Х. Жукавин, В.В. Цыпленков, S.G. Pavlov, H.-W. Hübers, P.J. Phillips. *Тр. XII Междунар. симп. „Нанотехника и наноэлектроника“* (Н.Новгород, Россия, 2008) т. 1, с. 182.
- [19] M. Steger, A. Yang, D. Karaiskaj, M.L.W. Thewalt, E.E. Haller, J.W. Ager, M. Cardona, H. Riemann, N.V. Abrosimov, A.V. Gusev, A.D. Bulanov, A.K. Kaliteevskii, O.N. Godisov, P. Becker, H.-J. Pohl. *Phys. Rev. B*, **79**, 205210 (2009).
- [20] И.Л. Бейнихес, Ш.М. Коган. *ЖЭТФ*, **93**, 1(7), 285 (1987).
- [21] L.E. Olivera, L.M. Falcon. *Phys. Rev. B*, **33**, 6990 (1986).

Редактор Л.В. Шаронова

## Shallow donor lasers in uniaxially stressed silicon

K.A. Kovalevsky, R.H. Zhukavin, V.V. Tsyplenkov, V.N. Shastin, N.V. Abrosimov\*, H. Riemann\*, S.G. Pavlov<sup>+</sup>, H.-W. Hübers<sup>+</sup>

Institute for Physics of Microstructures,  
Russian Academy of Sciences,  
603950 Nizhny Novgorod, Russia

\* Leibniz Institute for Crystal Growth,  
12489 Berlin, Germany

<sup>+</sup> Institute of Planetary Research, DLR,  
12489 Berlin, Germany

**Abstract** The experimental study of THz stimulated emission of group V donors (phosphor, antimony, arsenic and bismuth) in axially stressed silicon crystal excited by CO<sub>2</sub> laser radiation is presented. As shown, the compressive force applied along [100] increases small signal gain and efficiency and decreases substantially the laser threshold by one or two orders of magnitude. Donor laser frequencies from axially stressed silicon are measured and the laser transitions are identified. A theoretical estimate of the dependence of the laser state population on silicon compression applied along [100] crystallographic axis is given.