

# Поляризация терагерцового стимулированного излучения доноров в кремнии

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

<sup>+</sup> Институт физики микроструктур Российской академии наук,  
603950 Нижний Новгород, Россия

\*Берлинский университет им. Гумбольдта,  
Берлин, 10099

<sup>‡</sup> Институт оптических сенсорных систем DLR,  
Берлин, 12489

• Институт роста кристаллов,  
Берлин, D-12489

E-mail: atan4@yandex.ru

(Получена 27 апреля 2016 г. Принята к печати 10 мая 2016 г.)

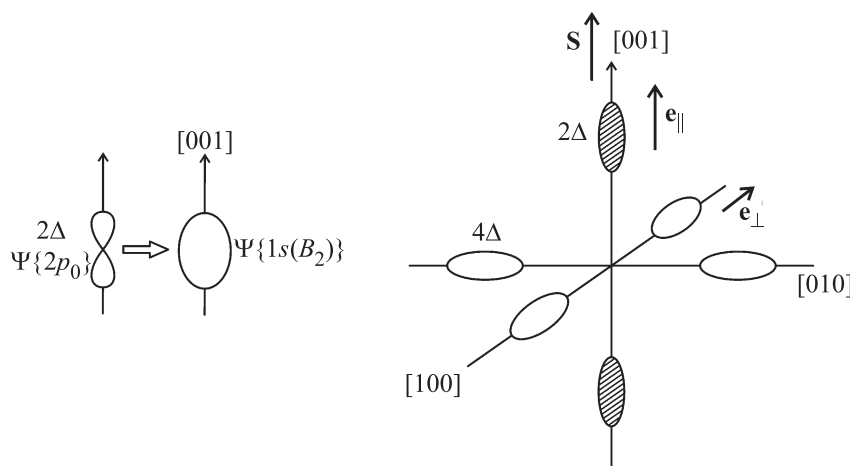
Приводятся результаты экспериментального исследования поляризации терагерцового (4.9–6.4 ТГц) стимулированного излучения доноров V группы (Sb, P, As, Bi) в монокристаллическом кремнии при их накачке (фотоионизации) излучением CO<sub>2</sub>-лазера (энергия кванта 117 мэВ) в зависимости от величины одноосной деформации сжатия кристалла по оси [100]. Также обсуждается влияние направления поля волны накачки на ее эффективность.

## 1. Стимулированное излучение в кремнии

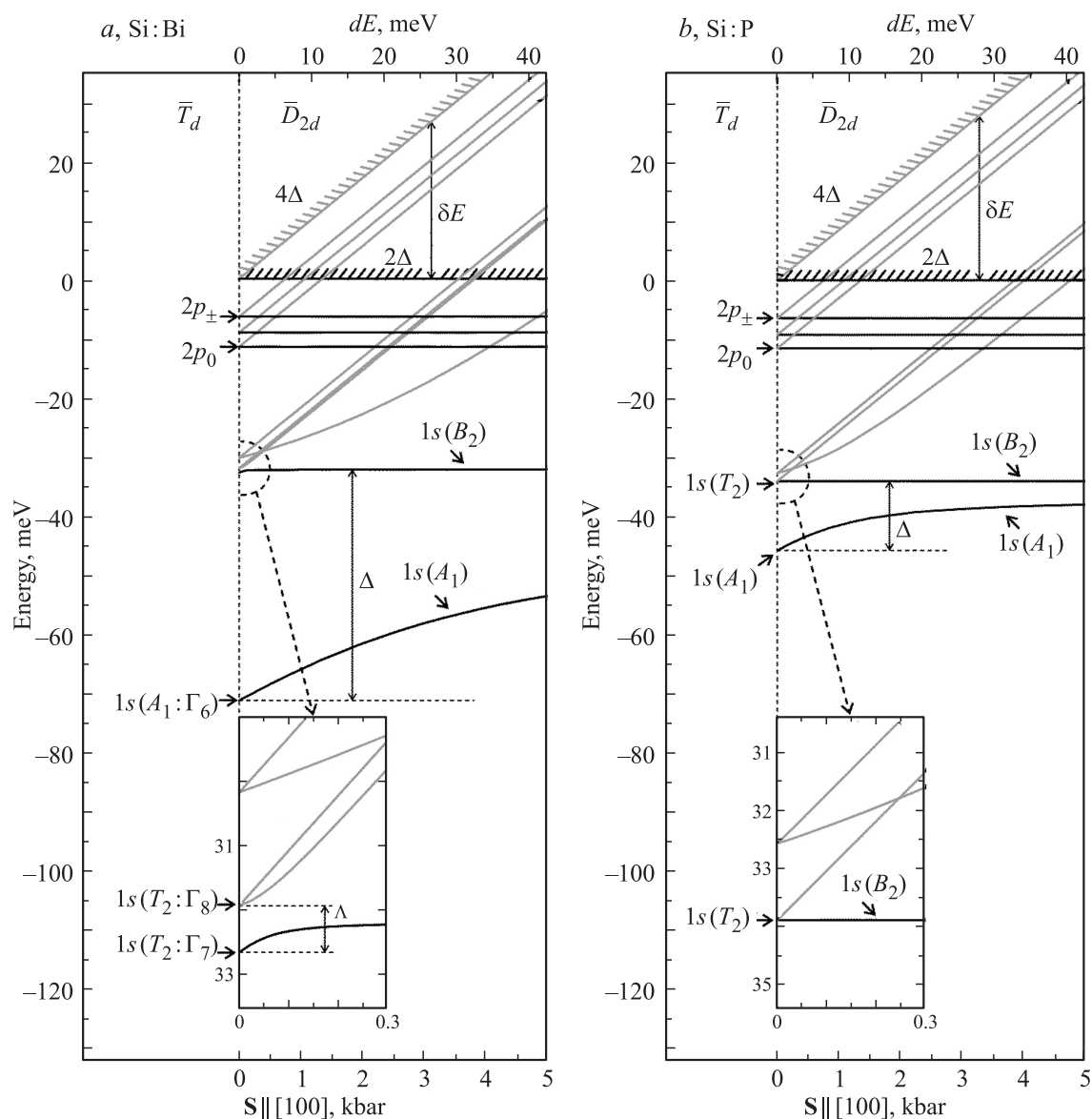
Как известно, доноры V группы в монокристаллическом кремнии сурьма Sb, фосфор P, мышьяк As, висмут Bi при их оптическом возбуждении в условиях низких температур ( $T < 20$  К) могут являться источником стимулированного излучения электромагнитных волн терагерцового диапазона частот ( $\nu = 4.9\text{--}6.4$  ТГц) на внутрицентровых переходах [1,2]. При этом эффективность оптической накачки, рабочие переходы и соответственно частоты генерации зависят от изначально возбуждаемых состояний. Эксперимент показывает, что возбуждение центров посредством их фотоионизации с использованием континуума зоны проводимости всегда приводит к генерации на переходах  $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$

и/или  $2p_{\pm} \rightarrow 1s(T_2)$  между отмеченными состояниями триплета, имеющими симметрию  $T_2$ . Напомним, что каждое из трех таких состояний  $1s(T_2)$  занимает пару долин (Δ-долин), расположенных на одной из осей [100] зоны Бриллюэна. Отметим, что все измерения в данной работе проводились при ионизации доноров излучением CO<sub>2</sub>-лазера (10.6 мкм, 117 мэВ).

В силу симметрии структуры зоны проводимости (рис. 1) в недеформированном кристалле кремния поляризация поля волны стимулированного излучения может быть любой и определяется добротными модами используемого резонатора. Ситуация меняется при одноосной деформации кристалла. Такая деформация, если она не направлена строго по одной из кристаллографических осей {111}, понижает симметрию кристалла, что вызывает относительное смещение долин



**Рис. 1.** Связь многодолинной структуры зоны проводимости при деформации сжатия  $S$  вдоль направления [100] с поляризацией излучения  $e$  на переходах между состояниями  $2p_0$  и  $1s(B_2)$ .



**Рис. 2.** Схема уровней электронных состояний донора при одноосной деформации сжатия кристалла кремния  $S \parallel [100]$ :  $a$  — Si:Bi,  $b$  — Si:P.  $T_d$  и  $D_{2d}$  — группы симметрии центра, символы в круглых скобках указывают на симметрию волновой функции примесного состояния,  $\Delta$  — химический сдвиг,  $\Lambda$  — спин-орбитальное расщепление.

зоны проводимости. Заметим, что каждая из шести долин в пространстве волновых векторов представляет собой вытянутый эллипсоид вращения с эффективными массами  $m_{\parallel} = 0.92m_0$  и  $m_{\perp} = 0.19m_0$  вдоль и поперек оси эллипсоида соответственно ( $m_0$  — масса свободного электрона) [3]. Очевидно, что понижение симметрии электронных состояний накладывает свои ограничения на возможную ориентацию поля излучения. Наибольший сдвиг долин по оси энергии достигается при одноосной деформации сжатия кристалла по одной из трех кристаллографических осей типа  $\{100\}$ . В этом случае две долины, лежащие на оси сжатия (2 $\Delta$ -долины), оказываются ниже по энергии других четырех 4 $\Delta$ -долин на величину  $\delta E(S)$  [4]. Далее рассматривается именно этот тип деформации.

При энергии сдвига  $\delta E > kT_e$ , где  $T_e$  — эффективная температура электронов континуума зоны проводимости, состояния 2 $\Delta$ -долин дают определяющий вклад во взаимодействие электронов с полем излучения и именно они диктуют правила отбора по поляризации для оптических переходов. При  $\delta E < kT_e$ , очевидно, возрастает роль и 4 $\Delta$ -долин. Следует обратить внимание на то, что частоты излучения в приближении кулоновского потенциала совпадают для 4 $\Delta$ - и 2 $\Delta$ -долин и различаются лишь в меру поправки, связанной со спин-орбитальным взаимодействием (рис. 2). Такая поправка проявляется в спектрах стимулированного излучения доноров сурьмы и висмута, что, в частности, позволяет установить, к какому типу долин относятся те или иные рабочие состояния. В то же время ее величина

для доноров фосфора и мышьяка слишком мала для обнаружения.

Другим параметром, позволяющим помочь в идентификации рабочих переходов и участвующих в процессе стимулированного излучения долин, является направление вектора поляризации поля стимулированного излучения. Таким образом, для идентификации рабочих состояний (переходов) стимулированного излучения доноров в кремнии кроме данных о частоте такого излучения необходимо иметь данные о его поляризации. В данной статье приводятся результаты измерений зависимости интенсивности стимулированного излучения для двух поляризаций,  $\mathbf{e}_{\parallel}$  и  $\mathbf{e}_{\perp}$ , поля волны стимулированного излучения, ориентированных вдоль и поперек направления деформации сжатия кристалла  $\mathbf{S} \parallel [100]$  соответственно. Отметим, что исследуемые образцы представляли собой сверхразмерные резонаторы на модах полного внутреннего отражения и их селективностью по отношению к поляризации можно было пренебречь. В обсуждении полученные данные сопоставляются с результатами измерений частот излучения. В статье также затрагивается вопрос об эффективности и пороге накачки для стимулированного излучения доноров для кремния, сжатого по оси  $[100]$ , в зависимости от направления поляризации поля волны излучения  $\text{CO}_2$ -лазера.

## 2. Техника измерений

Кристаллы кремния были выращены методом зонной плавки и легированы донорами V группы с концентрацией легирующей примеси  $N_d \approx 3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$  (отношение концентраций акцепторов и доноров  $N_a/N_d \sim 1\%$ ). Образцы имели форму параллелепипеда размером  $\sim 3 \times 5 \times 7 \text{ мм}$ , и все его грани были ориентированы по кристаллографическим направлениям типа  $\{100\}$ . Ориентация граней имела точность  $\sim 1'$ , и они были полированы. В результате такой образец становился добротным резонатором на модах полного внутреннего отражения. Выход излучения осуществлялся благодаря дифракции и/или отклонению граней от параллельности. Потери такого резонатора включая поглощение решеткой кристалла, согласно тестовым измерениям, не превышали  $0.01\text{--}0.02 \text{ см}^{-1}$ . Давление сжатия могло достигать 4–5 кбар и прикладывалось вдоль длинной стороны образца. Оптическая накачка на длине волны  $\lambda = 10.6 \text{ мкм}$  (энергия фотона  $\hbar\omega = 117 \text{ мэВ}$ ) осуществлялась импульсами  $\text{CO}_2$ -лазера длительностью  $\sim (100\text{--}300) \text{ нс}$ . Поле накачки  $\mathbf{E}$  могло быть ориентировано вдоль ( $\mathbf{E}_{\parallel}$ ) или перпендикулярно ( $\mathbf{E}_{\perp}$ ) деформации  $\mathbf{S}$ . Максимальное значение интенсивности накачки достигало  $\sim 300 \text{ кВт/см}^2$  в импульсе длительностью  $\sim (100\text{--}300) \text{ нс}$ . Поляризация выходного терагерцового (ТГц) излучения исследовалась с помощью поляризатора (степень поляризации  $> 99.5\%$ ), представляющего собой дифракционную решетку (фирма „Тидэкс“), работающую на пропускание. Охлаждение кремниевого образца осуществлялось жидким гелием. Оптическая схема измерений показана на рис. 3, а. ТГц излучение регистрировалось фотоприемником на основе Ge:Ga.

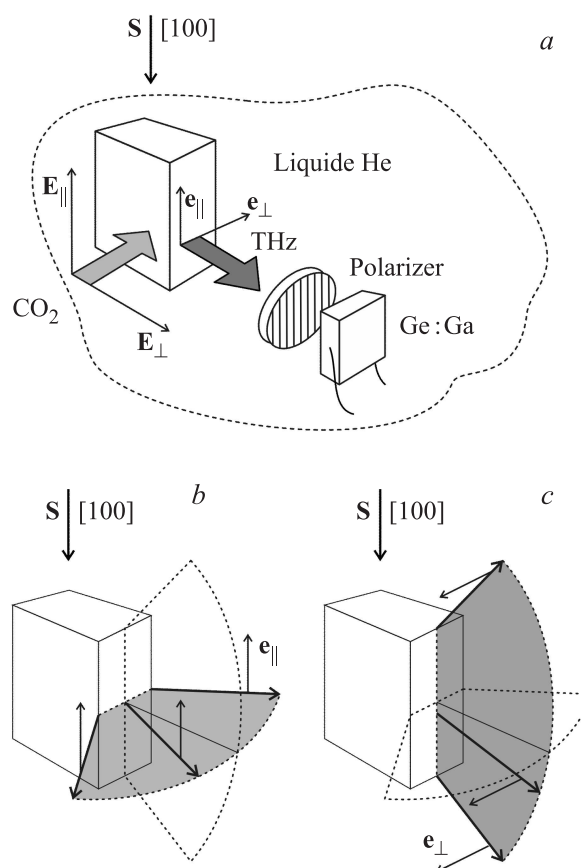


Рис. 3. а — оптическая схема эксперимента. б, в — направленность выходного излучения донора из сжатого по оси  $[100]$  кремния для направлений вектора поляризации  $\mathbf{e}_{\parallel}$  и  $\mathbf{e}_{\perp}$ .

Для блокировки рассеянного излучения накачки использовалась пластинка сафира толщиной в 1 мм. На рис. 3, б, в также показана направленность выходного излучения для волн двух поляризаций,  $\mathbf{e}_{\parallel}$  и  $\mathbf{e}_{\perp}$ .

## 3. Поляризация излучения и порог

Измерены проекции поля  $\mathbf{e}$  стимулированного ТГц излучения доноров сурьмы, фосфора, мышьяка и висмута в деформированном кремнии на направление вдоль ( $\mathbf{e}_{\parallel}$ ) и перпендикулярно ( $\mathbf{e}_{\perp}$ ) кристаллографическому направлению  $[100]$  (рис. 4). Показано, что поляризация выходного излучения вдоль направления приложения деформации  $\mathbf{S}_{\parallel}[100]$  ( $\mathbf{e}_{\parallel}$ ) доминирует практически во всех измерениях. Исключение составляет Si:Bi, где в области 0–2.3 кбар величина  $\mathbf{e}_{\perp}$  превосходит  $\mathbf{e}_{\parallel}$ .

Экспериментально получена зависимость порога генерации в Si:Sb от величины деформации  $\mathbf{S}$  вдоль  $[100]$  в области значений деформации  $\mathbf{S} \approx 0.2\text{--}1.2 \text{ кбар}$  для поляризаций  $\text{CO}_2$ -накачки  $\mathbf{E}_{\parallel}$  и  $\mathbf{E}_{\perp}$  (рис. 5). Для всех деформаций более высокие пороги генерации наблюдаются при поляризации  $\mathbf{E}_{\parallel}$ . Отношение порогов в области оптимальных деформаций  $\mathbf{S} \approx 0.6 \text{ кбар}$  составляет  $\sim 1.5$ .

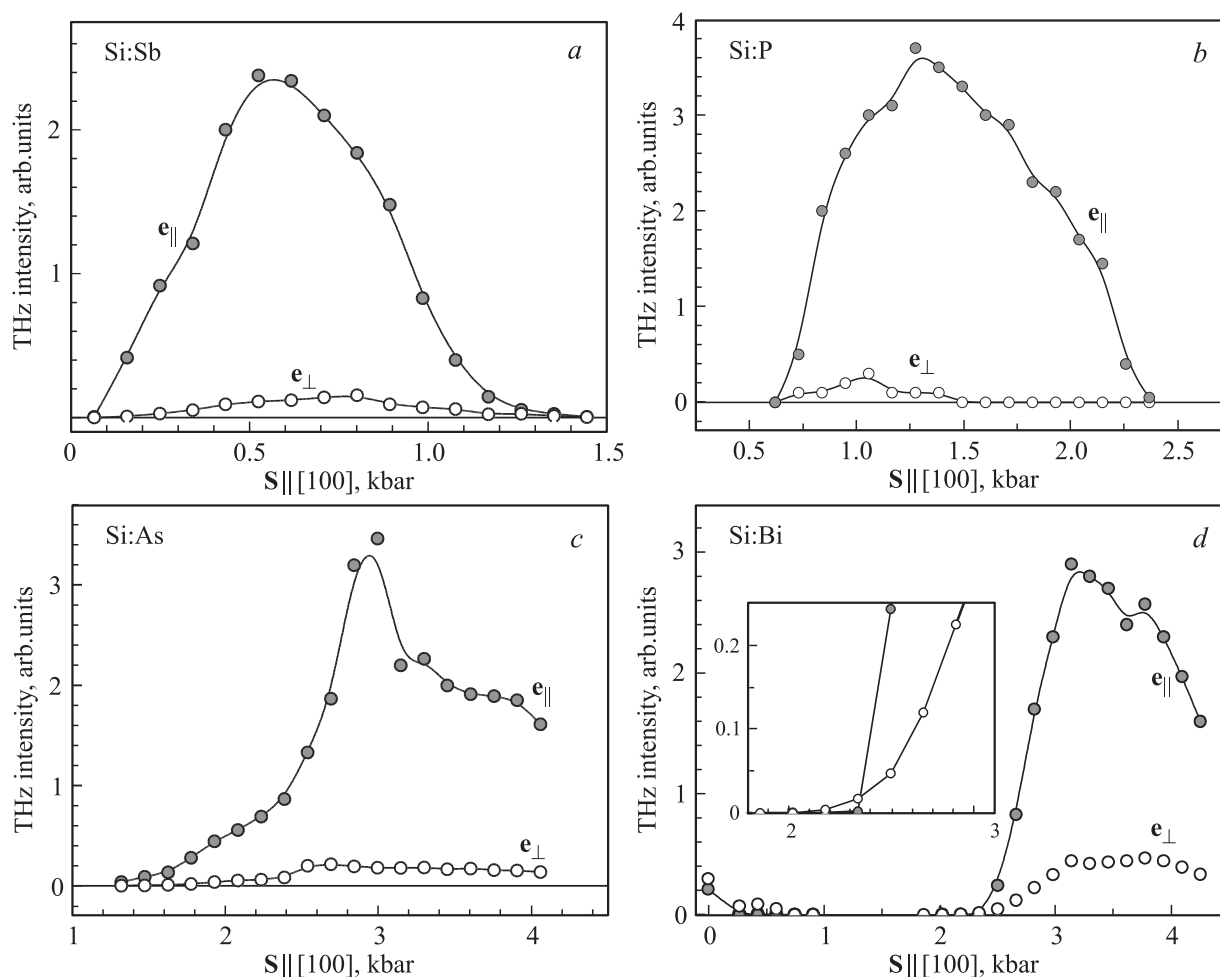
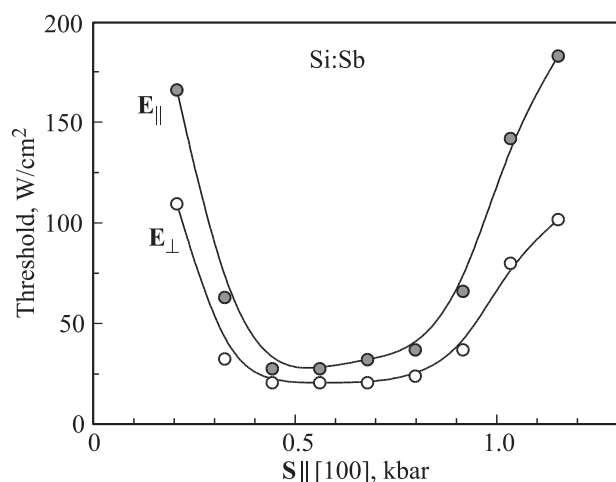


Рис. 4. Зависимость выходной интенсивности стимулированного терагерцового излучения доноров V группы от величины деформации  $S$  для двух проекций поляризации  $e_{\parallel}$  и  $e_{\perp}$ :  $a$  — Si:Sb,  $b$  — Si:P,  $c$  — Si:As,  $d$  — Si:Bi.

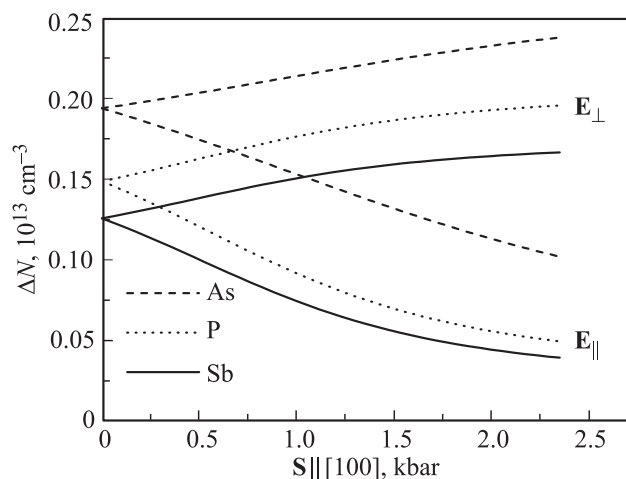
#### 4. Обсуждение

Из результатов измерений рис. 4 видно, что в рассматриваемом диапазоне параметра сжатия кристалла кремния доминирует компонента с направлением вектора поляризации  $e_{\parallel} \parallel S$ . Это согласуется с данными спектральных измерений [1,2] и подтверждает доминирующую роль переходов  $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)/1s(B_2)$  2 $\Delta$ -долин в стимулированном излучении указанных центров. Сигнал, отвечающий поляризации, направленной ортогонально оси деформации, относительно мал. Однако его присутствие указывает на возможное излучение и 4 $\Delta$ -долин. Аргументом в пользу такого заключения является наблюдаемое для Si:P и Si:As различие в зависимости интенсивности излучения от величины деформации для поляризаций  $e_{\parallel}$  и  $e_{\perp}$ . Различную зависимость можно ожидать по причине особенности в воздействии одной и той же деформации на различные переходы. Однако полностью нельзя исключить и дополнительный эффект деполаризации, связанной с несовершенством резонатора (отклонением формы образца от прямоугольного параллелепипеда и т.д.).

В отличие от образцов с центрами P и As на образце Si:Bi (см. рис. 4,  $d$ ) наблюдается более сложная картина. Видно, что при значениях  $2 < S < 2.5$  и 0–1 кбар интенсивность излучения с  $e_{\perp} \perp S$  сравняется или даже превышает таковую для  $e_{\parallel} \parallel S$ . В совокупности с данными спектральных измерений [1,2] это означает сравнимый или даже преобладающий при таких параметрах сжатия кристалла вклад 4 $\Delta$ -долин. Кроме этого, поляризационные измерения на образцах Si:Bi не согласуются с данными спектральных измерений, полученных на этом же материале. Согласно последним, при деформациях с  $S > 2$  кбар донор висмута излучает на переходах  $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$  4 $\Delta$ -долин. Сигнал  $e_{\perp}$  действительно наблюдается на рис. 4,  $d$ , но он меньше сигнала  $e_{\parallel}$ . Противоречие разрешается, если предположить, что в действительности стимулированное излучение 4 $\Delta$ - и 2 $\Delta$ -долин имеет разное направление выхода (рис. 3,  $b, c$ ). Мы предполагаем, что при проведении спектральных измерений [1,2] излучение с  $e_{\parallel} \parallel S$  не было направлено по оптической оси спектрометра и поэтому не регистрировалось. Для подтверждения такого заключения об излучении на переходах  $2p_0 \rightarrow 1s(T_2)$  нижних 2 $\Delta$ -долин



**Рис. 5.** Зависимость пороговой интенсивности накачки при возбуждении  $\text{CO}_2$ -лазером ( $\lambda = 10.6$  мкм,  $\tau = 300$  нс) от деформации сжатия кремния  $S \parallel [100]$  для доноров Sb.



**Рис. 6.** Инверсия населенностей  $\Delta N$  между рабочими состояниями в зависимости от величины деформации  $S \parallel [100]$  для двух типов поляризации накачки  $E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$ .

необходимо провести дополнительные спектральные исследования.

Относительно поляризационной зависимости пороговой интенсивности накачки при  $S \parallel [100]$  (рис. 5) можно сказать, что этот эффект ожидаем. Он связан с анизотропией массы электронов долин зоны проводимости. В направлении меньшей массы  $m_{\perp}$  значение парциального сечения фотоионизации должно быть больше грубо в  $m_{\parallel}/m_{\perp}$  раз. Более точное значение зависимости сечения фотоионизации от направления вектора поляризации поля волны можно получить, опираясь на расчеты работы [5]. Проведенная нами теоретическая оценка инверсной населенности рабочих состояний показана на рис. 6. Она учитывает зависимость от деформации только сечения фотоионизации, поэтому описывает относительное поведение порогов для  $E_{\parallel}$  и  $E_{\perp}$  и находится в хорошем согласии с измерениями порога стимулированного излучения доноров сурьмы

в зависимости от одноосной деформации кристалла и поляризации излучения  $\text{CO}_2$ -лазера.

## 5. Заключение

Получены экспериментальные данные, подтверждающие возможность эффектов стимулированного излучения доноров V группы в кремнии на 4Δ-долинах при одноосной деформации сжатия кристалла вдоль одной из осей типа [100]. Показано, что на донорах висмута генерация ТГц излучения на внутрицентровых переходах 4Δ-долин может быть достаточно эффективной. Экспериментально показана возможность повышения эффективности и уменьшения порога накачки для стимулированного излучения доноров V группы в сжатом по оси [100] кремнии. Показано, что для этого необходимо ориентировать поляризацию поля накачки ортогонально оси деформации.

Работа поддержана субсидией Министерства образования и науки РФ № RFMEFI61614X0008 и грантом InTerFEL Project, BMBF № 05K2014.

## Список литературы

- [1] К.А. Ковалевский, Р.Х. Жукавин, В.В. Цыпленков, В.Н. Шастин, Н.В. Абросимов, Г. Рима, С.Г. Павлов, Г.-В. Хьюберс. ФТП, **47** (2), 199 (2013).
- [2] К.А. Ковалевский, Н.В. Абросимов, Р.Х. Жукавин, С.Г. Павлов, Г.-В. Хьюберс, В.В. Цыпленков, В.Н. Шастин. Квант. электрон., **45** (2), 113 (2015).
- [3] J.C. Hensel, H. Hasegawa, M. Nakayama. Phys. Rev., **138**, A225 (1965).
- [4] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках (М., Наука, 1972).
- [5] И.Л. Бейнихес, Ш.М. Коган. ЖЭТФ, **93**, (1(7)), 285 (1987).

Редактор Л.В. Шаронова

## Polarization of induced THz emission of donors in silicon

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

<sup>+</sup> Institute for Physics of Microstructures, Russian Academy of Sciences, 603950 Nizhny Novgorod, Russia

<sup>\*</sup> Humboldt-University of Berlin, Berlin, 10099

<sup>‡</sup> Institute of Optical Sensor Systems, Berlin, 12489

<sup>•</sup> Leibniz Institute for Crystal Growth, Berlin, D-12489

**Abstract** The experimental results on polarization of terahertz (4.9–6.4 THz) stimulated radiation of V group donors (Sb, P, As, Bi) in monocrystalline silicon under  $\text{CO}_2$  laser pumping (photoionization with quantum energy 117 meV) depending on the magnitude of the uniaxial deformation along the crystal axis [100] are presented. The influence of the pump wave field direction on its effectivity is also discussed.