

Терагерцовая электролюминесценция в условиях пробоя мелкого акцептора в германии

А. В. Андрианов¹⁾, А. О. Захарьин, И. Н. Яссиевич, Н. Н. Зиновьев

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 Санкт-Петербург, Россия

Поступила в редакцию 4 марта 2004 г.

Получен спектр спонтанной терагерцовой электролюминесценции в условиях вблизи порога пробоя мелкого акцептора (Ga) в германии. Спектры излучения измерялись методом фурье-спектроскопии при температуре ~ 5.5 – 5.6 К. В спектре излучения наблюдаются узкие линии излучения с максимумами при ~ 1.99 ТГц (8.2 мэВ) и ~ 2.36 ТГц (9.7 мэВ), соответствующие оптическим переходам неравновесных дырок в основное состояние примесного центра из возбужденных состояний примеси. Видна также широкая линия с максимумом при ~ 3.15 ТГц (13 мэВ), относящаяся к переходам дырок из валентной зоны на основное состояние примеси. При повышении напряженности электрического поля вклад переходов неравновесных дырок из состояний в валентной зоне возрастает. При этом в спектре излучения начинают проявляться также оптические переходы неравновесных дырок между подзонами валентной зоны. Интегральная мощность терагерцового излучения составляет ~ 17 нВт при 1 Вт подводимой электрической мощности.

PACS: 07.57.Nm, 78.60.Fi, 78.67.De

Область электромагнитного спектра терагерцового (ТГц) диапазона (называемого также дальним инфракрасным диапазоном) в настоящее время интенсивно исследуется. Интерес к терагерцовому излучению обуславливается возможностями его применения во многих чрезвычайно важных областях науки и техники, таких как физика конденсированного состояния, медицина и биология, техника связи и дистанционного контроля. Демонстрация униполярного полупроводникового ТГц лазера, работающего на внутриволноводных оптических переходах электронов в квантово-каскадных структурах [1] может привести к созданию твердотельных монохроматических ТГц источников с токовым возбуждением. Недавно реализованы также полупроводниковые лазеры с оптической накачкой, в которых генерация ТГц излучения обусловлена фотоионизацией примесного центра и последующими переходами фотоносителей из разрешенной зоны на уровни примеси [2]. В работе [3] сообщалось о наблюдении интенсивного спонтанного ТГц излучения, возникающего при пробое примеси электрическим полем в структуре на основе Si(B). В германии ударная ионизация мелких примесей имеет место в полях значительно меньших по сравнению с кремнием, и достигается уже в полях напряженностью в несколько В/см [4–7]. Интегральное ТГц излучение при ударной ионизации мелких примесей (As, Sb) в германии наблюдалось

в работе [4]. Спектр спонтанного излучения при пробое мелких доноров (As, Sb, P) электрическим полем был получен в работах [5, 6]. Интегральное ТГц излучение при ударной ионизации мелких акцепторов в германии наблюдалось во многих работах (см., например, [7, 8] и ссылки там). Тем не менее, спектральных исследований спонтанного ТГц излучения в условиях пробоя мелких акцепторов в германии ранее не проводилось. Между тем именно на переходах между состояниями мелкого акцептора (Ga) в деформированном германии в условиях пробоя примеси электрическим полем предложен механизм лазерной генерации на резонансных состояниях [9]. Поэтому экспериментальное спектроскопическое исследование излучательных переходов при захвате неравновесных дырок на акцепторные уровни в германии является чрезвычайно актуальной задачей. В настоящей работе получен спектр спонтанного ТГц излучения, возникающего при электрическом пробое мелкого акцептора (Ga) в Ge, вблизи порога примесного пробоя.

Образцы были приготовлены из p -Ge(Ga) с удельным сопротивлением $10 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ($N_A - N_D = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) в форме прямоугольных пластинок размером 1.5×6 мм и толщиной 1.5 мм. Омические контакты были созданы путем сплавления индия с галлием на боковые грани размером 1.5×15 мм. Образцы укреплялись на медном хладопроводе гелиевого оптического криостата. Для крепления использовалась вакуумная смазка ОСТ 38 0183-75, имею-

¹⁾e-mail: alex.andrianov@mail.ioffe.ru

шая высокую теплопроводность и обеспечивающую хорошую электрическую изоляцию образца от хладопровода криостата. Исследуемый образец окружался медными гелиевым и азотным экранами с окнами, изготовленными из черного полиэтилена и германия, соответственно. Теплое окно криостата было выполнено из материала ТРХ. Температура на хладопроводе криостата контролировалась калиброванным германиевым термометром-сопротивлением, укрепленным в непосредственной близости к исследуемому образцу. Напряжение на образец подавалось в виде “пачек” импульсов. Длительность импульсов в “пачке” 10 нс при частоте 50 кГц. Длительность “пачек” составляла 6.2 мс, а их частота 80 Гц. Детектором ТГц излучения служил охлаждаемый жидким гелием кремниевый болометр QMC Instruments с полосовым оптическим фильтром, обеспечивающий работу детектора в спектральной области $2\text{--}400\text{ см}^{-1}$ ($0.06\text{--}120\text{ ТГц}$). Сигнал с детектора измерялся с помощью lock-in-усилителя SR-530. Для записи спектров излучения использовался откачной фурье-спектрометр (описание экспериментальной установки см. в [10, 11]). На исследуемых образцах Ge(Ga) проводились измерения также и спектров низкотемпературной фотопроводимости. В качестве источника излучения в этом случае использовался излучатель типа “черного тела” на основе вольфрамовой нити, разогреваемой электрическим током.

На рис.1 показан спектр ТГц излучения, измеренный при напряжении между контактами 4.5 В (соответствует напряженности поля $\sim 7.5\text{ В/см}$) и температуре на хладопроводе криостата 5.5 К. Здесь приведен также спектр сигнала фотопроводимости, измеренный на том же образце Ge(Ga). Спектры были измерены с разрешением $\sim 0.3\text{ ТГц}$ ($\sim 1.2\text{ мэВ}$) Характерная зависимость тока от напряжения на исследуемом образце *p*-Ge, а также зависимость интегральной интенсивности ТГц излучения от амплитуды напряжения приведены на рис.2.

Можно видеть (см. рис.2) резкое возрастание тока через образец при напряжении V между контактами выше $\sim 2\text{ В}$, обусловленное электрическим пробоем примеси, что соответствует напряженности поля пробоя $\sim 3.3\text{ В/см}$. Такая величина поля примесного пробоя для Ge(Ga) согласуется с данными других авторов (см., например, [7] и ссылки там). Из рис.2 также видно, что ТГц излучение появляется при достижении примесного пробоя. Интенсивность излучения резко возрастает при $V > 2\text{ В}$, достигает максимума при $V \sim 8.3\text{ В}$ (соответствует напряженности поля $\sim 13.8\text{ В/см}$), затем наблюдается уменьшение интенсивности ТГц излучения с ростом напряже-

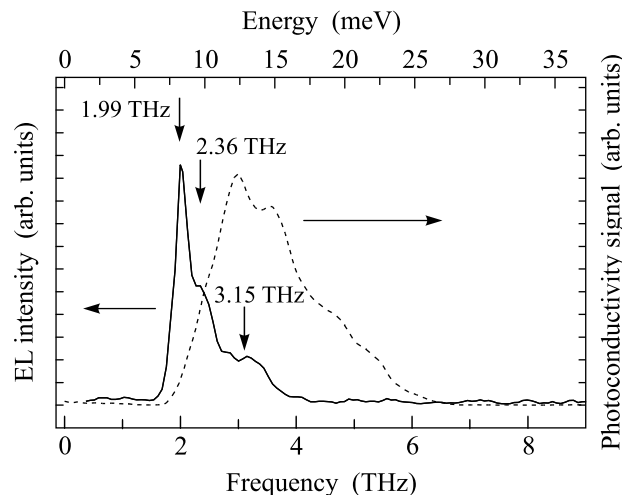


Рис. 1. Спектр ТГц излучения при 4.5 В, $T = 5.5\text{ К}$ – сплошная кривая. Показан также спектр фотопроводимости – штриховая линия. Сигналы не нормированы на спектральную чувствительность измерительной системы

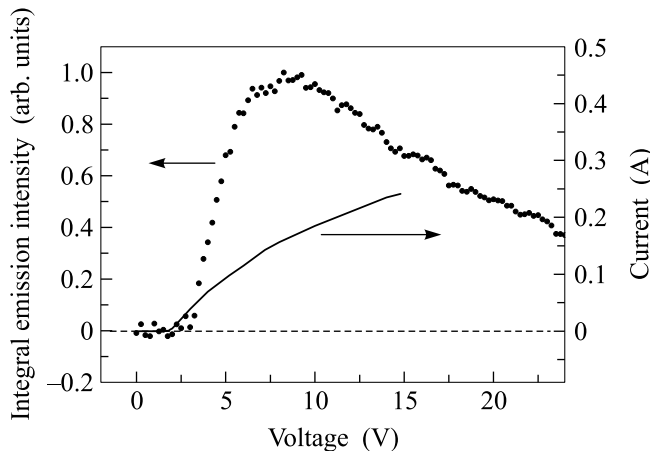


Рис.2. Зависимость интегральной интенсивности ТГц излучения от напряжения на образце – точки; *p*-Ge(Ga); $N_A - N_D = 4 \cdot 10^{14}\text{ см}^{-3}$; Зависимость тока через образец от напряжения – сплошная кривая. Штриховая линия – уровень нулевого сигнала. Температура хладопровода криостата в этих опытах была в пределах 5.5–5.7 К

ния. Максимум в зависимости интегральной интенсивности излучения от напряженности поля наблюдался в Ge(Ga) в полях $\sim 15\text{--}20\text{ В/см}$ [7] и связывался с проявлением внутризонных излучательных переходов неравновесных дырок. Небольшой спад интенсивности излучения с ростом напряженности поля в области от 20 В/см до 100 В/см, наблюдаемый в [7], связывался с проявлением стриминга функции распределения дырок в сильном электрическом поле. Наблюдаемый в нашем эксперименте спад интенсив-

ности ТГц излучения при $V > 8.3$ В более резкий, чем в [7], и это может быть обусловлено, в дополнение к отмеченному выше механизму, влиянием разогрева решетки при напряжениях 10–25 В.

В спектре излучения вблизи порога примесного пробоя (см. рис.1) видна узкая линия с максимумом при 1.99 ТГц (8.25 мэВ), положение этого максимума близко к порогу появления сигнала примесной фотопроводимости. Узкая интенсивная линия излучения при 1.99 ТГц может быть отнесена к оптическому переходу между первым возбужденным и основным состоянием примеси Ga в германии ($2p-1s$ -переход), что неплохо согласуется с энергией связи примеси 10.8 мэВ, известной из литературы [12]. Высоочастотная асимметрия основной линии излучения может быть отнесена за счет вклада узкой линии с максимумом при ~ 2.36 ТГц (9.7 мэВ), а также широкой линии с максимумом ~ 3.15 ТГц (13 мэВ). Линия при 2.36 ТГц соответствует переходу между одним из возбужденных состояний примеси (например из $n = 3$) и основным состоянием. За излучение при 3.15 ТГц скорее всего ответственны переходы горячих дырок в основное состояние примеси, а характерная энергия дырок, участвующих в таком переходе, должна быть ~ 2.2 мэВ (эффективная температура ~ 26 К). Расчеты методом Монте-Карло [13] неравновесной функции распределения дырок, генерируемых в валентную зону в результате ударной ионизации мелкого акцептора в германии, при электрических полях ~ 7 В/см дают величину эффективной температуры дырок, близкую к приведенной выше. Дальнейшие измерения ТГц излучения с более высоким спектральным разрешением позволят более детально исследовать структуру в спектре.

На рис.3 показаны спектры ТГц излучения, измеренные при напряжениях 5 В и 7 В. Температура хладопровода криостата в обоих случаях не превышала 5.6 К, а при 5 В она была ниже. Можно видеть, что с ростом напряженности поля спектр излучения существенно меняется. При этом возрастает вклад оптических переходов горячих дырок из валентной зоны на основное состояние примеси. Наблюдается также появление заметного низкочастотного крыла линии $2p-1s$ -перехода. Последнее можно объяснить вкладом внутризонных излучательных оптических переходов неравновесных дырок, приводящих к появлению ТГц излучения на частотах $\sim 0.75-1.65$ ТГц (3.1–6.8 мэВ).

Оценка мощности ТГц излучения с учетом поправок на эффективность сбора и доставки излучения к детектору дают величину ~ 17 нВт при подводимой электрической мощности 1 Вт для образца p -Ge

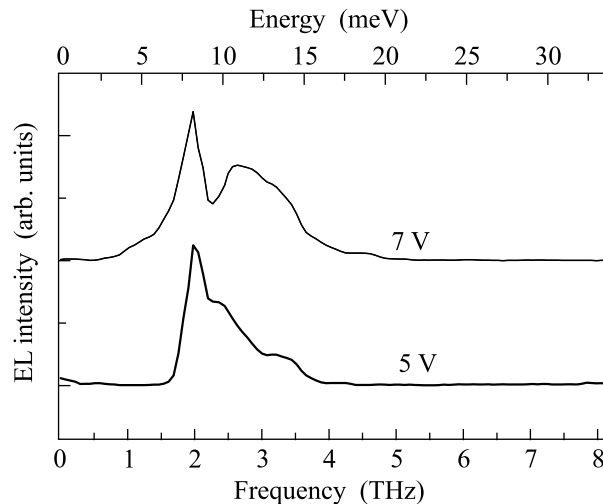


Рис.3. Спектры ТГц излучения при 5 В и 7 В. Спектры нормированы на максимум сигнала и смещены по вертикали для ясности. Сигналы не нормированы на спектральную чувствительность измерительной системы. Необходимо отметить, что провал, наблюдаемый при ~ 2.35 ТГц, связан скорее всего с поглощением в оптическом фильтре QMC болометра, и для устранения такого искажения спектра требуется дальнейшая работа

($N_A - N_D = 4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$) размером $1.5 \times 1.5 \times 6 \text{ мм}^3$ при $T = 5.6$ К. Высокая интенсивность ТГц излучения в p -Ge(Ga), возникающего при излучательном захвате дырок на примесный уровень, может явиться весомым фактором при построении относительно простых и недорогих источников ТГц излучения с электрической накачкой на область ~ 2 ТГц.

В заключение мы отметим, что в настоящей работе получены спектры спонтанной ТГц электролюминесценции при пробое мелкого акцептора (Ga) в германии вблизи порога примесного пробоя. В спектре излучения отчетливо выделены узкие линии переходов дырок между возбужденными состояниями и основным состоянием примесного центра. Также идентифицирована особенность в спектре излучения, связанная с переходами дырок внутри валентной зоны, а также с переходами из состояний в валентной зоне на основное состояние примеси. Высокий квантовый выход излучательных переходов будет являться важным фактором при разработке ТГц излучателей на область ~ 2 ТГц с электрической накачкой.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант # 03-02-17512), фондов ISTC (грант # 2206p) и CRDF (грант # RP-2-2552-MO-03), а также при частичной поддержке Программы “Низкоразмерные и квантовые структуры” Президиума РАН.

-
1. R. Köhler, A. Tredicucci, F. Beltram et al., *Nature* **417**, 156 (2002).
 2. S. G. Pavlov, R. Kh. Zhukavin, E. E. Orlova et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5200 (2000).
 3. T. N. Adam, R. T. Troeger, S. K. Ray et al., *Appl. Phys. Lett.* **83**, 1713 (2003).
 4. S. H. Koenig and R. D. Brown, *Phys. Rev. Lett.* **4**, 170 (1960).
 5. S. N. Solomon and H. Y. Fan, *Phys. Rev.* **B1**, 662 (1970).
 6. S. R. Thomas and H. Y. Fan, *Phys. Rev.* **B9**, 4295 (1974).
 7. Л. В. Берман, Л. И. Гавриленко, З. Ф. Красильник и др., *ФТП* **19**, 369 (1985).
 8. Ю. Л. Иванов, в тем. сб. *Вопросы физики полупроводников*, Мат. XI Зимней школы по физ. полупров., Л.: ФТИ им. А.Ф.Иоффе, 1984, с. 160-181.
 9. Yu. P. Gousev, I. V. Altukhov, V. P. Sinis et al, *Appl. Phys. Lett.* **75**, 757 (1999).
 10. Н. Н. Зиновьев, А. В. Андрианов, В. Н. Некрасов и др., *Письма в ЖЭТФ* **74**, 100 (2001).
 11. Н. Н. Зиновьев, А. В. Андрианов, В. Н. Некрасов и др., *ФТП* **36**, 234 (2002).
 12. R. Newman and W. W. Tyler, *Solid State Physics*, Eds. F. Seitz and D. Turnbull, Vol. **8**, Acad. Press, New York, 1959, p. 50.
 13. W. Quade, G. Hupper, and E. Schöll, *Phys. Rev.* **B49**, 13408 (1994).