

## Спонтанное излучение дырок, возбужденных электрическим полем в германии

© Я.Е. Покровский<sup>¶</sup>, Н.А. Хвальковский

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук,  
125009 Москва, Россия

(Получена 23 марта 2010 г. Принята к печати 30 марта 2010 г.)

Исследована зависимость интегральной интенсивности спонтанного излучения дырок в Ge с примесью Ga при возбуждении импульсным электрическим полем напряженностью  $E$  до 3 кВ/см и одноосном сжатии кристаллов в направлениях [001] и [111] давлением  $P$  до 12 кбар. Установлено, что интенсивность излучения в сильном электрическом поле определяется процессами возбуждения и релаксации легких дырок даже при  $P = 0$ . Обнаружено, что существенный вклад в излучение дают горячие дырки с энергиями, значительно превышающими энергию оптического фонона в германии. Впервые получены и интерпретированы спектры спонтанного излучения горячих дырок в сильном электрическом поле. При  $P = 0$  и  $E > 500$  В/см энергия дырок не ограничена энергией оптического фонона, а спектр излучения дырок в области 45–85 мэВ имеет структуру, аналогичную спектру поглощения оптическими фононами. Это указывает на накопление горячих дырок при сильном взаимодействии с колебаниями кристаллической решетки Ge. Обсуждаются детали такого взаимодействия.

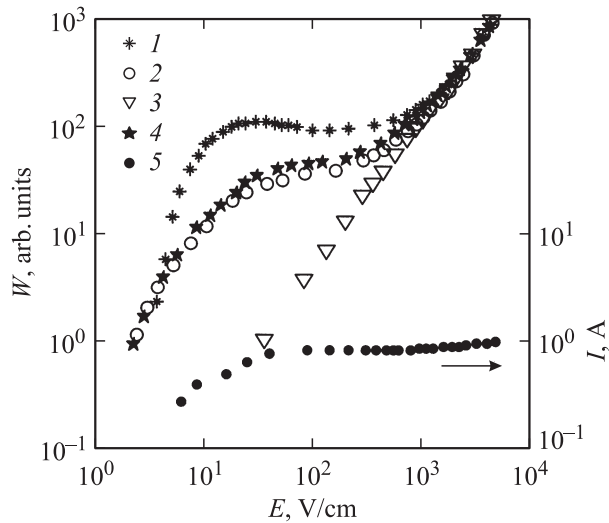
В серии работ (см., например [1] и ссылки там же) сообщалось о возбуждении электрическим полем стимулированного излучения в одноосно-сжатых кристаллах Ge, легированного Ga. Предполагалось, что излучение возникает за счет накопления дырок в  $s$ -образных состояниях примеси Ga, смещенных под воздействием деформации в область непрерывного спектра. Исследование энергетического спектра дырок при слабом и сильном их возбуждении может быть полезным для понимания процессов, происходящих в этих условиях. Состояния дырок в Ge, легированном Ga, были исследованы в [2,3] методами абсорбционной и фотоэлектрической спектроскопии при сжатии кристаллов давлением  $P$  в направлениях [111] и [001]. В подзоне легких дырок вблизи ее края были обнаружены  $p$ -образные резонансные состояния примеси и определены величины расщепления зон легких и тяжелых дырок в зависимости от  $P$ . Однако эти эксперименты дают информацию лишь о переходах дырок из основного  $s$ -образного в возбужденные  $p$ -образные состояния, стимулированные же переходы из  $p$ - в  $s$ -состояния могут проявиться лишь в излучении дырок.

Для определения диапазона энергий, в котором возникает спонтанное излучение горячих дырок, исследованы зависимости интегральной интенсивности излучения и тока через образцы Ge, легированного Ga в концентрации  $N = 10^{14}$  см<sup>-3</sup>, от электрического поля  $E$  напряженностью до 3 кВ/см в отсутствие воздействия фона излучения комнатной температуры. Использовались образцы размерами  $1 \times 1 \times 10$  мм, на торцы которых наносились контакты из In или InGaSn. Для подавления влияния инжекции электронов образцы грубо шлифовались. Излучение регистрировалось фотосопротивлениями (ФС) из Ge и Si, легированными примесями с различными энергиями иониза-

ции  $E_i$  от 10.5 до 45 мэВ [4], находившимися в общей гелиевой ванне с излучающими образцами. Использовались также охлаждаемые светофильтры, не пропускавшие фотоны с большими энергиями. Было установлено, что в сильных полях определяющий вклад в излучение дают дырки с энергиями вплоть до  $\sim 90$  мэВ.

На рис. 1 приведены некоторые наиболее характерные зависимости интенсивности излучения дырок  $W(E)$  при сжатии образцов давлением  $P$  в направлениях [001] и [111]. Видно, что эти зависимости при  $P[001] = 6$  кбар и  $P[111] = 9$  кбар практически совпадают. Это естественно, поскольку расщепление ветвей валентной зоны Ge при сжатии по [001] (3.65 мэВ/кбар) в 1.5 раза больше, чем при сжатии по [111] (2.5 мэВ/кбар [3], в [1] — 4 мэВ/кбар). При давлении  $P[001] = 10$  кбар, когда расщепление подзон достигает энергии возбуждения оптического фонона (37 мэВ [5]), излучение дырок удалось зарегистрировать лишь при  $E > 60$  В/см. Это может быть связано с тем, что излучательные бесфононные переходы легких дырок с моментом  $1/2$  в основном состоянии примеси Ga  $S_1$  ( $1/2$ ) запрещены. При этом давлении зависимость  $W(E)$  была близкой к линейной ( $W \propto E^{1.3}$ ) и она не изменялась при возрастании  $P$  до 12 кбар. При меньших  $P$  такая зависимость имела место при больших  $E$  после насыщения тока через образцы. При  $P = 0$  аналогичная зависимость наблюдалась при  $E > 1$  кВ/см. Из идентичности ответов ФС следует, что в сильном электрическом поле интенсивность излучения определяется переходами легких дырок даже в отсутствие расщепления ветвей валентной зоны. При концентрации дырок  $10^{14}$  см<sup>-3</sup> плотность тока насыщения через образцы была 100 А/см<sup>2</sup> (рис. 1). При динамическом разогреве [6] средняя дрейфовая скорость легких дырок должна достигать  $3 \cdot 10^7$  см/с. Оценка показывает, что доля таких горячих дырок, определяющая плотность тока, не превышает 0.2.

<sup>¶</sup> E-mail: yaep@mail.cplire.ru



**Рис. 1.** Зависимость интегральной интенсивности  $W$  спонтанного излучения дырок из образца Ge с концентрацией Ga  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  от напряженности электрического поля  $E$  (В/см), зарегистрированного фотосопротивлением из Ge[As] ( $E_i = 14.2 \text{ мэВ}$ ) при одноосном сжатии давлением  $P$  (кбар): 1 — 0, 2 — 6[001], 3 — 10[001], 4 — 9[111], 5 — зависимость тока через образец  $I(E)$  при  $P[001] = 10$  кбар.

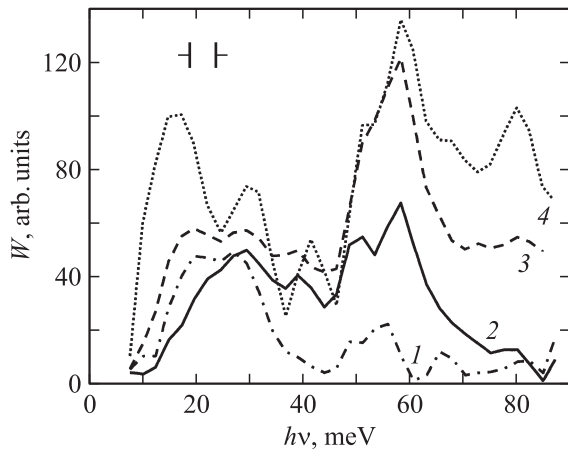
Следует также учесть, что при большой напряженности электрического поля  $E$  в условиях эксперимента неизбежен нагрев образцов, и их температура может достигать 30 К [6]. Действительно, в отсутствие теплового фона, когда сопротивление ФС и нагрузки достаточно велики, помимо экспоненциального возрастания и спада сигнала с постоянной времени  $\sim 10$  мкс проявлялась медленная релаксация ответа ( $\sim 100$  мкс), вызванная нагревом образца. Однако при уменьшении нагрузки до 1 кОм ответ повторял форму прямоугольного возбуждающего импульса длительностью до 10 мкс. Влияние контактов было также исключено в результате следующего эксперимента. Излучающий образец был помещен внутри узкой стеклянной трубки длиной 10 мм, в центральной части которой было вырезано окно высотой 3 мм, обращенное к фотоприемнику. Ответ ФС при этом уменьшился приблизительно втрое, но его зависимость от напряженности электрического поля не изменилась. Из этих контрольных экспериментов следует, что спектры, которые будут рассмотрены далее, действительно обусловлены излучением горячих дырок в объеме кристаллов Ge.

Интегральная интенсивность излучения дырок исследовалась в условиях, когда тепловой фон минимален и сопротивление ФС обычно составляло сотни МОм. Иная ситуация возникает при спектральных исследованиях, когда на ФС воздействует тепловой фон комнатной температуры. При этом сопротивление ФС понижалось более чем на 3 порядка и выделение слабого кратковременного ответа ФС являлось трудной задачей. Удо-

влетворительной оказалась конструкция фотоприемного устройства, в которой длинный кристалл легированного Ge впаивался индием в криостат так, что его верхняя половина находилась в жидком He, а нижняя, рабочая — в вакууме. Это обеспечило эффективное охлаждение ФС, позволило свести к минимуму его емкость и избежать шума, связанного с модуляцией теплового фона пузырьками кипящего He. Нижний токовый контакт кристалла через вакуумное уплотнение соединялся тонким коротким проводом с входом каскодного предусилителя. Постоянная времени ответа в такой конструкции не превышала 1 мкс. Наиболее успешным оказалось использование ФС из Ge, легированного Ga в концентрации  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , чувствительного в диапазоне энергий фотонов 10–100 мэВ. Выяснилось также, что использование охлаждаемых светофильтров, ограничивающих интенсивность фонового излучения и спектральный диапазон ФС, не дает заметного выигрыша, но лишь затрудняет интерпретацию результатов. Но даже после оптимизации условий регистрации излучения дырок спектры удалось записать, лишь ограничив разрешение ( $\sim 5 \text{ мэВ}$ ), многократно (до 20 раз) и медленно регистрируя их короткие фурье-образы.

Спектры излучения дырок в Ge были исследованы ранее [7] при возбуждении небольшим (до 10 В/см) электрическим полем. Трудности возникают при  $E > 500$  В/см, когда при длительности возбуждающего импульса 10 мкс и токе  $\sim 1$  А в образце выделяется энергия  $\sim 10^{-2}$  Дж и частота следования не должна превышать 10–30 Гц. В таких условиях использование стробинтегратора малоэффективно и улучшение отношения исследуемого и шумового сигналов достигалось в основном за счет большого времени накопления сигнала в выходном блоке измерительного прибора. Поскольку при сжатии излучающих образцов возможна их поломка, методика исследований отработывалась при  $P = 0$ . Однако уже в этих условиях проявились неожиданные особенности излучения горячих дырок. Спектры излучения дырок, возбужденных электрическим полем напряженностью 25–2500 В/см в образце Ge(Ga) с  $N = 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , регистрировались в диапазоне энергий фотонов  $h\nu = 10\text{--}100$  мэВ и нормировались на эффективность светодетектора, которая определялась по излучению кварцевого баллона ртутной лампы. Предполагалось, что баллон нагрет до температуры около 1000 К и его спектр близок к спектру излучения абсолютно черного тела. Тогда интенсивность его излучения должна возрастать приблизительно пропорционально энергии фотонов  $h\nu$ , и это было учтено при нормировке. Отметим, что при такой обработке результатов спектры демонстрируют лишь присутствие дырок с определенными энергиями, но не их концентрацию в соответствующих состояниях, так как квантовый выход излучения при различных переходах может различаться на порядки величины.

Нормированные таким образом спектры излучения дырок приведены на рис. 2. При  $E = 25$  В/см спектр



**Рис. 2.** Спектры спонтанного излучения дырок из образца Ge с концентрацией Ga  $10^{14} \text{ см}^{-3}$  при  $P = 0$ , зарегистрированного фотоспротивлением Ge[Ga] ( $E_i = 12.3 \text{ мэВ}$ ) при возбуждении электрическим полем напряженностью  $E$  (В/см): 1 — 25, 2 — 50, 3 — 1000, 4 — 2500.

в области малых энергий аналогичен приведенному в [7], т.е. обусловлен захватом дырок, локализованных вблизи минимума энергии валентной зоны на примесные уровни Ga. Эта область спектра мало изменяется, по крайней мере до  $E = 100 \text{ В/см}$ . При дальнейшем возрастании  $E$  максимум излучения заметно смещается в сторону больших энергий вследствие разогрева дырок, но его интенсивность существенно не уменьшается. При  $E = 1 \text{ кВ/см}$  возникает более длинноволновая широкая полоса, которая не может быть связана с захватом дырок на примесь Ga. Интенсивность этой полосы возрастает при увеличении  $E$ , и она доминирует при малых энергиях фотонов. Вероятное происхождение этой полосы излучения — переходы горячих легких дырок в подзону тяжелых дырок вблизи края валентной зоны. Полосы излучения в области больших энергий проявляются уже при  $E = 25 \text{ В/см}$ . Вначале возникает полоса излучения в области энергий 45–55 мэВ, что указывает на накопление дырок при их взаимодействии с оптическим фоном с последующим их переходом в основное состояние примеси Ga (37 мэВ + 11.3 мэВ). Интенсивность этой полосы возрастает с ростом электрического поля и при  $E = 1 \text{ кВ/см}$  она доминирует. Однако увеличение  $E$  до 2.5 кВ/см не приводит к существенному росту ее интенсивности. Это согласуется с насыщением тока через образец Ge(Ga) в сильном электрическом поле. Неожиданным оказалось возникновение полосы излучения горячих дырок с максимумом при 80 мэВ и сверхлинейное возрастание ее интенсивности при увеличении  $E$ . Полоса соответствует энергии перехода дырок в основное состояние примеси Ga при их взаимодействии с двумя оптическими фотонами. Таким образом, весь коротковолновый участок спектра повторяет структуру поглощения излучения при возбуждении оптических фононов в Ge [8]. Оценка показывает, что

накопление дырок при таком взаимодействии возможно. Действительно, время динамического разогрева легких дырок при  $E = 3 \text{ кВ/см}$  близко к  $3 \cdot 10^{-13} \text{ с}$  [6], а ширина полос излучения не превышает 10 мэВ, что соответствует времени релаксации не менее  $5 \cdot 10^{-13} \text{ с}$ . Значительное время жизни горячих дырок при взаимодействии с оптическими фотонами может быть обусловлено их многократным упругим рассеянием с изменением направления движения, но без потери энергии. При этом коротковолновая полоса излучения возникает за счет переходов горячих дырок, не претерпевших рассеяния на оптическом LO фотоне. Благодаря малой концентрации таких дырок они не вносят значительного вклада в ток через образец. Однако их время жизни может оказаться большим, поскольку в этой области энергий возможна лишь более медленная многофононная релаксация, сопровождающаяся возрастанием квантового выхода излучения дырок. Возможность накопления горячих дырок при их взаимодействии с оптическими колебаниями кристаллической решетки не противоречит теоретическим оценкам [6], но энергия дырок не ограничена энергией оптического фотона.

В заключение отметим, что структура спектров излучения горячих дырок в кристаллах недеформированного Ge оказалась сложной. Исследование эволюции спектров при одноосном сжатии образцов германия может упростить ситуацию.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 07-02-00083 и 09-02-01538).

## Список литературы

- [1] М.С. Каган, И.В. Алтухов, В.П. Синис, Е.Г. Чиркова, И.Н. Яснеевич, Дж. Колодзей. РЭ, **48**, 1137 (2003).
- [2] Я.Е. Покровский, Н.А. Хвальковский. Письма ЖЭТФ, **80**, 381 (2004).
- [3] Я.Е. Покровский, Н.А. Хвальковский. ФТП, **39**, 197 (2005).
- [4] А.К. Ramdas, S. Rodrigues. Rep. Progr. Phys., **44**, 1287 (1981).
- [5] П.И. Баратынский, В.П. Ключков, И.В. Потыкевич. Полупроводниковая электроника. Справочник (Киев, Наук. думка, 1975).
- [6] А.А. Андронов. ФТП, **21**, 1153 (1978).
- [7] А.В. Андрианов, А.О. Захарьин, И.Н. Яснеевич, Н.Н. Зиновьев. Письма ЖЭТФ, **79**, 448 (2004).
- [8] В.Н. Brockhouse. J. Phys. Chem. Sol., **8**, 400 (1958).

Редактор Л.В. Беляков

## Spontaneous radiation of holes excited by electric field in germanium

Ya.E. Pokrovskii, N.A. Khvalkovskii

Institute of Radioengineering and Electronics,  
Russian Academy of Sciences,  
125009 Moscow, Russia

**Abstract** Dependence of total intensity of spontaneous hole radiation in Ge, doped with Ga, excited by pulsing electric field  $E$  till 3 kV/cm have been investigated under uniaxial compression  $P$  till 12 kbar in directions [001] and [111]. It have been established that intensity of radiation in the strong electric field is determined by the processes of excitation and relaxation of light holes even at  $P = 0$ . It was found, that hot holes with energies much more that optical phonon energy give sufficient contribution in radiation. In the first time have been obtained and interpreted the spectra of spontaneous radiation of hot holes in the strong electric field. At  $P = 0$  and  $E > 500$  V/cm the energy of holes is not limited by energy of the optical phonon but spectra of hole radiation in the region 45–85 meV have the structure similar to optical photon spectrum. That points to the accumulation of holes at strong interaction with crystalline lattice vibration of Ge. Details of the interactions are discussed.