

# ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ ДЫРОК В ОДНООСНО-СЖАТОМ ГЕРМАНИИ

Я. Е. Покровский\*, Н. А. Хвальковский

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

Поступила в редакцию 2 апреля 2013 г.

Для определения энергетического спектра состояний дырок в германии с примесью галлия, при переходах дырок между которыми возможно возбуждение стимулированного излучения, были исследованы спонтанное излучение и фотопроводимость этого материала. Дырки возбуждались импульсами электрического поля напряженностью до 12 кВ/см при  $T = 4.2$  К и одноосном сжатии образцов до 12 кбар. Установлено, что спектры излучения дырок при переходах между резонансными и локальными состояниями примеси имеют структуру, идентичную спектрам фотопроводимости и поглощения. Переходы из резонансных состояний, связанные с подзоной тяжелых дырок, обнаружены не были. Установлено, что в электрическом поле менее 100 В/см и сжатии кристаллов излучение возникает при переходах тяжелых дырок. В сильном электрическом поле (1–3 кВ/см) излучение наблюдается в области энергий до 140 мэВ и в нем проявляются переходы с эмиссией ТА- и LO-фононов. Спектры излучения при давлении 0 и 12 кбар различаются незначительно. Отсюда следует, что в сильном электрическом поле вклад тяжелых и легких дырок неразличим.

DOI: 10.7868/S0044451013100167

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование оптических переходов дырок в одноосно-сжатом германии было начато авторами в 2004 г. Задача заключалась в определении энергетического спектра состояний, за счет переходов дырок между которыми возможно возбуждение стимулированного излучения. Предполагалось, что это излучение возникает при инверсном заселении резонансных состояний, связанных с подзоной тяжелых дырок, отщепленной давлением  $P$  (см. работу [1] и ссылки там же). Для определения энергетического спектра дырок в работах [2, 3] были исследованы поглощение и фотопроводимость германия, легированного примесью Ga. Использовались образцы, вырезанные из тех же слитков Ge, что и в работе [1]. Образцы сжимались в направлениях [111] и [001] в гелиевой ванне оптического криостата. При сжатии образцов некоторые возбужденные состояния примеси Ga становились резонансными, т. е. оказывались в области непрерывного спектра, но были сосредоточены вблизи минимума энергии подзоны легких ды-

рок. Особенности, указывающие на возникновение резонансных состояний, связанных с подзоной тяжелых дырок, обнаружены не были [3]. Определенная в работе [1] зависимость энергии линий излучения  $h\nu$  от давления  $P$  в направлении [111] соответствовала расщеплению подзон легких и тяжелых дырок равному примерно 4 мэВ/кбар. Это противоречит величине расщепления подзон 2.5 мэВ/кбар, определенной в работе [3]. Был и ряд других расхождений в интерпретации результатов в работах [1–3]. Это явилось основанием для пересмотра результатов [1] и выполнения настоящих исследований.

## 2. МЕТОДЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Для исследования спонтанного рекомбинационного излучения использовались образцы Ge, легированного Ga в концентрации  $10^{14}$  см $^{-3}$ , размерами  $1 \times 1 \times 10$  мм $^3$ , вырезанные в направлениях [111] и [001]. На торцы образцов наносились контакты из In или сплава InGaSn, жидкого при комнатной температуре. Важную роль играло состояние поверхности образцов, поскольку при протравливании кристаллов в CP-4 часто возникала инжекция электронов из контактов. В сильном (1–3 кВ/с) электриче-

\*E-mail: yaep@cplire.ru

ском поле дрейфовая длина электронов превышала длину образцов, что сопровождалось возрастанием тока с 1 А примерно до 7 А. Одновременно возникало собственное излучение электронов и дырок с максимумом при 1.727 мкм (0.718 эВ). Перегрев образцов вызывал образование пузыря газообразного He. Через некоторое время или при небольшом увеличении напряжения возгоралось излучение, интенсивность которого более чем на два порядка превышала интенсивность собственного рекомбинационного излучения. Излучение имело линейчатый спектр искрового разряда в газообразном He, и в нем доминировали линии 2.058 мкм парагелия и 1.083 мкм ортогелия. Разряд, видимый через кварцевое окно криостата, происходил между контактами по поверхности образцов и вызывал ее эрозию. Поэтому для подавления влияния инжекции электронов поверхность образцов грубо шлифовалась. Торцы образцов вдавливались при комнатной температуре в контактные прокладки из отожженной меди. Кристаллы сжимались давлением  $P$  вплоть до 12 кбар в гелиевой ванне оптического криостата. Образцы возбуждались импульсами напряженностью до 3 кВ/см с различной длительностью и частотой повторения, не вызывавших перегрева и образования пузыря газообразного гелия. Излучение анализировалось фурье-спектрометром ЛАФС 1000. Квантовый выход излучения был незначительным. В области энергий 5–15 мэВ для регистрации излучения использовался охлаждаемый кремниевый болометр. Поскольку постоянная времени ответа болометра была порядка 1 мс, образцы возбуждались длинными (0.1–0.3 мс) импульсами с частотой 30 Гц. При энергии фотонов более 10 мэВ использовались охлаждаемые жидким He фотосопротивления (ФС) из германия, легированного Ga, As и некоторыми другими примесями. При  $E \approx 2\text{--}3$  кВ/см во избежание перегрева образцов длительность возбуждающих импульсов не превышала 10 мкс при частоте следования 10 Гц. Фотосопротивления имели сопротивление несколько МОм. Для эффективного выделения слабого сигнала требовалась нагрузка около 1 МОм при малой постоянной времени ответа. Поэтому было необходимо уменьшить емкость ФС примерно до 10 пФ. Такая конструкция с выводом короткого контактного провода от ФС в криостате к усилителю была разработана, что обеспечило возможность выполнения исследований. После усиления фотоответ усреднялся строб-интегратором и обрабатывался на ЭВМ. При  $E > 1$  кВ/см проводилось многократное (10–20 раз) сканирование спектров и ограничивалось разрешением.

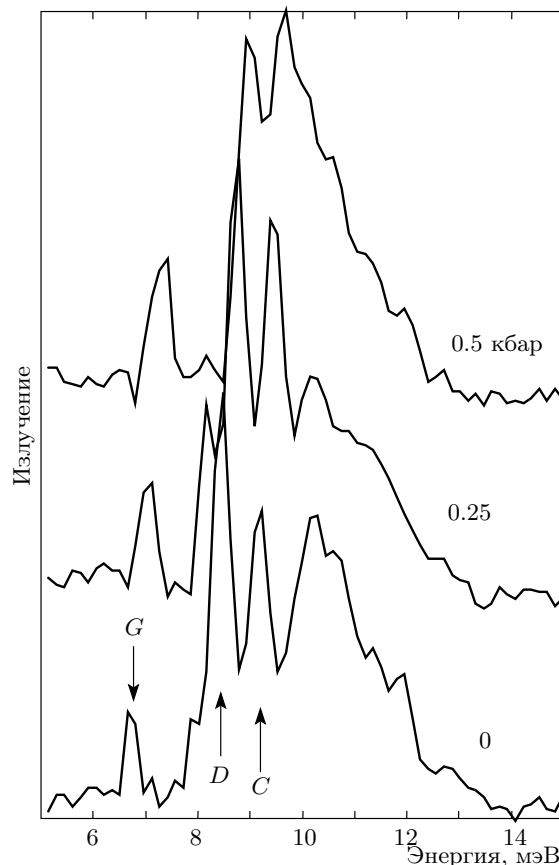


Рис. 1. Эволюция спектров излучения при возбуждении дырок в Ge[Ga] электрическим полем  $E = 10$  В/см и небольшом сжатии в направлении [111]

### 3. ОПТИЧЕСКИЕ ПЕРЕХОДЫ ДЫРОК С УЧАСТИЕМ ЛОКАЛЬНЫХ И РЕЗОНАНСНЫХ СОСТОЯНИЙ ПРИМЕСИ

В области энергий 5–15 мэВ спектры излучения регистрировались кремниевым болометром с разрешением 0.15 мэВ. Использовался светоделитель толщиной 25 мкм, спектры не нормировались. При  $E = 10$  В/см и  $P = 0$  спектр был аналогичен спектрам фотопроводимости и поглощения примеси Ga [2, 3]. В спектре преобладали полосы с энергиями 6.74 мэВ ( $G$ ), 8.44 мэВ ( $D$ ) и 9.19 мэВ ( $C$ ) (рис. 1), которые соответствуют переходам из  $p$ -образных состояний  $1\Gamma_{8-}$ ,  $2\Gamma_{8-}$  и  $1\Gamma_{7-}$  в основное состояние акцептора  $1\Gamma_8$  [4]. Уширение линий до 0.5 мэВ могло быть вызвано практически полной ионизацией акцептора. В работе [5] в отсутствие сжатия при ионизации примеси Ga электрическим полем были зарегистрированы лишь полосы излучения с энер-

гиями 8.3 и 9.7 мэВ (возможно, полосы  $D$  и  $C$ ). Полоса  $G$  по непонятной причине в спектре отсутствовала. При сжатии образцов вдоль оси  $[111]$  полосы сначала смещались в область больших энергий (рис. 1). При  $P = 3$  кбар полоса  $G$  проявлялась при 7.6 мэВ. В работе [5] представлен спектр излучения при этой единственной величине сжатия германия по направлению  $[111]$ . Предполагалось, что полоса возникает при переходах дырок из резонансного состояния, связанного с подзоной тяжелых дырок, в возбужденное локальное состояние легких дырок. В таком случае при дальнейшем возрастании  $P$  полоса должна была бы смещаться в область больших энергий по мере увеличения расщепления подзон. Однако в наших экспериментах при  $P > 3$  кбар полоса смещалась в область меньших энергий (рис. 2) и при  $P = 12$  кбар соответствовала энергии 6.4 мэВ. Полоса  $G$  оставалась узкой при возрастании  $P$ , в то время как полосы  $D$  и  $C$  уширялись и становились резонансными. На рис. 3 представлены спектры фотопроводимости при сжатии в направлении  $[111]$  и тех же давлениях. Из рис. 4 видно, что спектры излучения и фотопроводимости имеют идентичную структуру, хотя отношения интенсивности полос различаются. При сжатии кристаллов в направлении  $[001]$  эволюция спектров при возрастании  $P$  была аналогичной (рис. 5). Однако уже при  $P > 4$  кбар все полосы излучения становились резонансными. Резонансные состояния, связанные с подзоной тяжелых дырок, обнаружены не были.

#### 4. ИЗЛУЧЕНИЕ ГОРЯЧИХ ДЫРОК

Зависимость интегральной мощности  $W$  излучения от величины сжатия в направлении  $[111]$  давлением  $P$  и напряженности электрического поля  $E$  исследована при экранировании источника и приемников от воздействия фона комнатной температуры. Излучение возникало после начала ионизации примеси Ga при  $E$  (1–3) В/см и регистрировалось болометром. При  $E > 10$  В/см ответ возрастал более чем на порядок величины и незначительно уменьшался при возрастании  $P$  до 12 кбар (рис. 6). При регистрации излучения фотосопротивлением из Ge(As), чувствительного при энергии фотонов более 14 мэВ, ответ при  $P = 0$  был аналогичным. Однако ответ ФС сильно уменьшался при возрастании  $P$  (рис. 6). При сжатии вдоль оси  $[001]$  и  $P = 12$  кбар излучение проявлялось лишь при  $E > 50$  В/см [6]. Отсюда следует, что при низковольтном возбуждении и сильном сжатии кристаллов  $W$  определяется перехо-

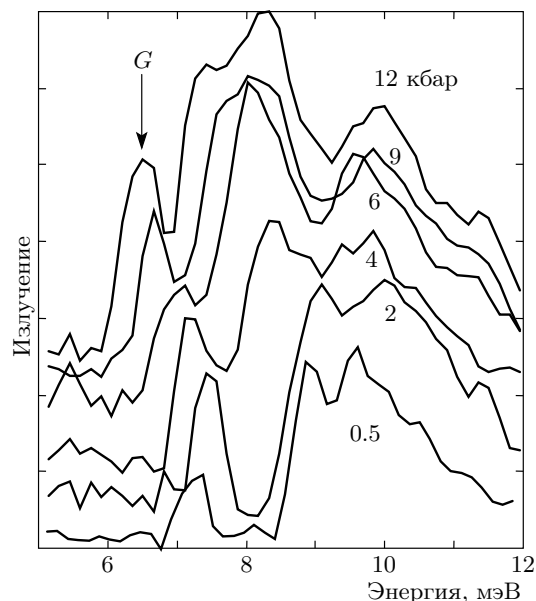


Рис. 2. Спектры излучения при возбуждении дырок в Ge[Ga] электрическим полем  $E = 10$  В/см и сжатии кристаллов в направлении  $[111]$  давлением 0.5, 2, 4, 6, 9, 12 кбар

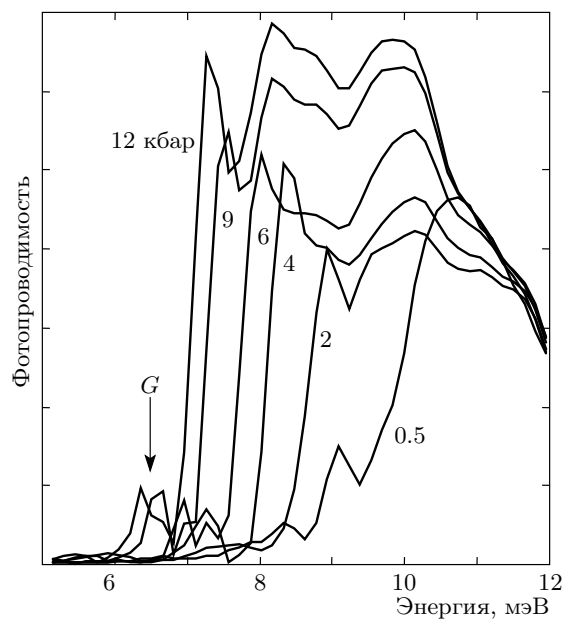


Рис. 3. Спектры фотопроводимости Ge[Ga] при сжатии образцов в направлении  $[111]$  давлением 0.5, 2, 4, 6, 9, 12 кбар

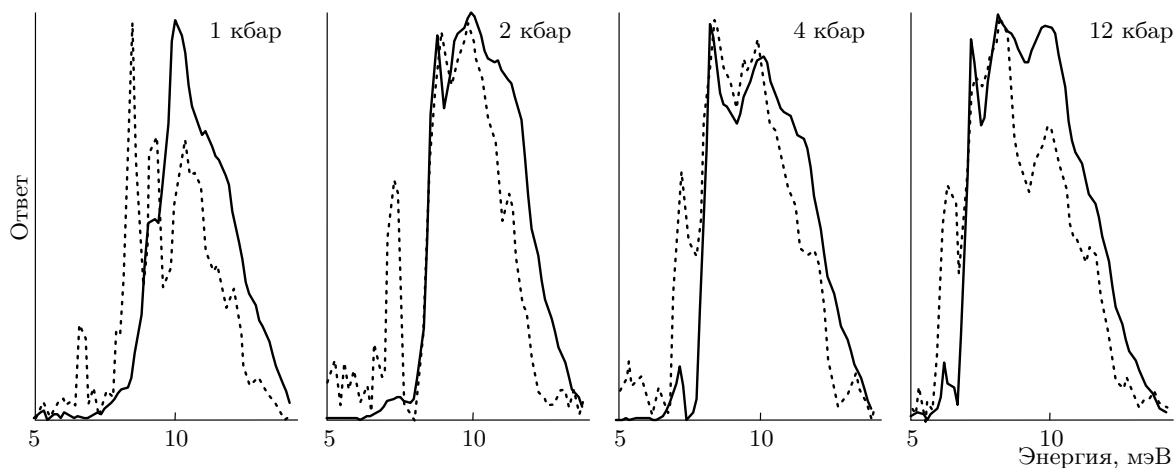


Рис. 4. Сравнение спектров фотопроводимости (сплошные линии) и излучения (пунктир) Ge[Ga] при различном сжатии кристаллов в направлении [111]

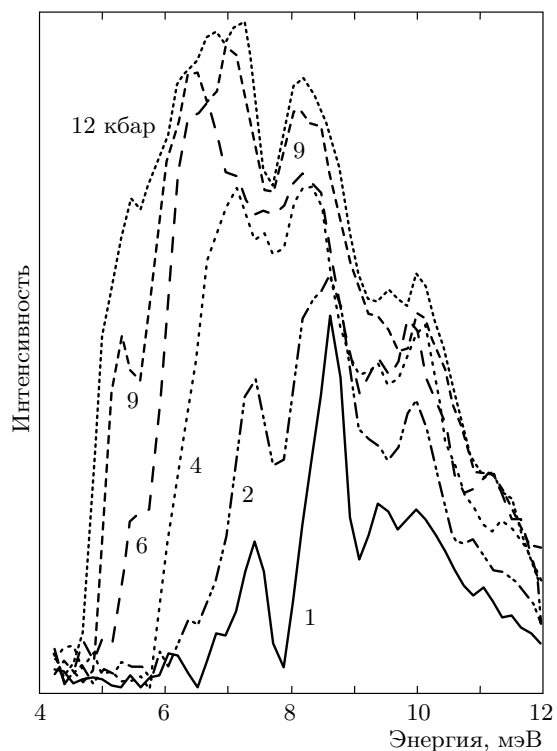


Рис. 5. Спектры излучения при возбуждении дырок в Ge[Ga] электрическим полем  $E = 10$  В/см и сжатии кристаллов в направлении [001] давлением 1, 2, 4, 6, 9, 12 кбар

дами из состояний, связанных с подзоной тяжелых дырок. При  $E > 1$  кВ/см мощность излучения возрастала сверхлинейно ( $W \propto E^{1.5}$ ) и не зависела от

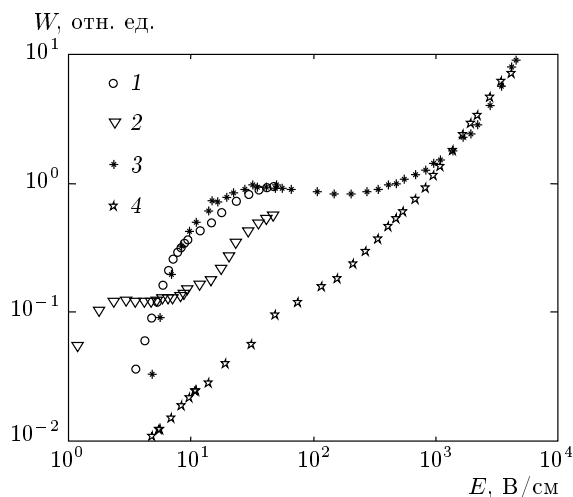


Рис. 6. Зависимости интегральной интенсивности излучения дырок, возбужденных в Ge[As] электрическим полем при различном сжатии образцов в направлении [111]: 1, 2 — при регистрации болометром, 1 —  $P = 0$ , 2 — 12 кбар; 3, 4 — при регистрации фотосопротивлением Ge[Ga], 3 —  $P = 0$ , 4 — 12 кбар

величины отщепления подзоны тяжелых дырок давлением  $P$  [6]. Ток через образцы также не зависел от величины давления и напряженности электрического поля. Отсюда следует, что лишь малая часть горячих дырок не рассеивалась при взаимодействии с ЛО-фононами. Поэтому вклад таких горячих дырок в ток через образец был незначительным.

Исследование спектров излучения подтверждает

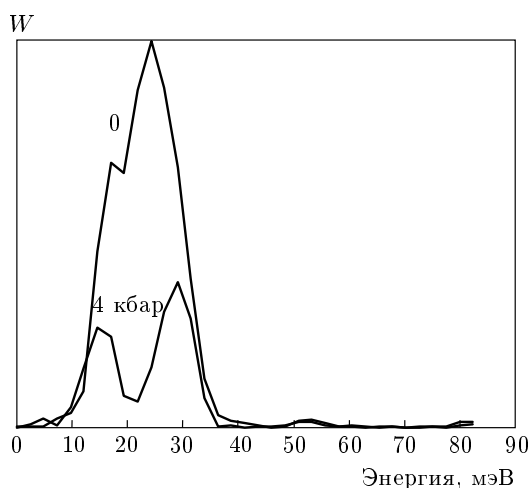


Рис. 7. Спектры излучения при возбуждении дырок в Ge[Ga] электрическим полем  $E = 25$  В/см и сжатии кристаллов в направлении [001] давлением  $P = 0, 4$  кбар

ет это заключение. Спектры наблюдались в очень широкой области энергий фотонов. Использовалось ФС из германия, легированного Ga в концентрации  $10^{16}$  см $^{-3}$ . Пороговая чувствительность ФС в условиях сильной засветки фоновым излучением комнатной температуры уменьшалась на несколько порядков. По этой причине спектры многократно записывались при ограниченном разрешении 4 мэВ. Это соответствовало примерно 20 точкам в спектре в диапазоне 10–90 мэВ. Несмотря на угловатость спектров, результаты хорошо воспроизводились и могут быть надежно интерпретированы. Для записи спектров использовались лавсановый светоделитель толщиной 3.5 мкм и кремниевые окна в гелиевых ваннах криостатов. Спектры не нормировались, поскольку для идентификации излучательных переходов дырок было достаточно лишь спектрального положения полос.

Ряд спектров при  $P = 0$  и возбуждении импульсами с напряженностью от 0 до 3 кВ/см был представлен в работе [6]. На рис. 7 приведены спектры излучения дырок при возбуждении образцов импульсами напряженностью 25 В/см и длительностью 10 мкс при  $P = 0$  и  $P = 4$  кбар. Видно, что единственная широкая полоса излучения дырок при сжатии расщепляется на две полосы существенно меньшей интегральной интенсивности. Расстояния между максимумами полос близки к 15 мэВ в соответствие с величиной расщепления подзон (3.65 мэВ/кбар [3]) при таком сжатии. При дальней-

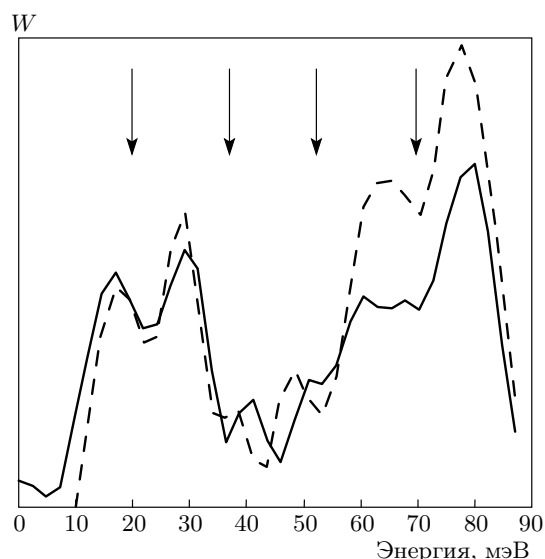


Рис. 8. Спектры излучения дырок при сжатии в направлении [001]:  $P = 0, E = 2.5$  кВ/см — сплошная линия;  $P = 12$  кбар,  $E = 3$  кВ/см — штриховая линия. Стрелки соответствуют энергиям взаимодействия дырок с примесью, ТА- и LO-фононами

шем возрастании  $P$  коротковолновая полоса исчезала. Это подтверждает заключение о том, что при низковольтном возбуждении интенсивность излучения определяется переходами тяжелых дырок. Мы полагаем, что излучательные переходы легких дырок на основной уровень энергии примеси запрещены правилами отбора. При  $E > 1$  кВ/см в спектрах развивались полосы в широкой области энергий. Соотношение интенсивности полос зависело от величины  $P$  и  $E$ , что может быть связано с образованием доменов сильного и слабого электрического поля. Однако при  $E = 3$  кВ/см и давлениях 0 и 12 кбар спектры становились практически одинаковыми и простирались до энергии примерно 140 мэВ. На рис. 8 представлены спектры излучения при  $P = 0$  и  $P = 12$  кбар. Стрелками отмечены энергии, соответствующие переходам дырок с участием ТА- и LO-фононов [7]. Независимость спектров от величины сжатия указывает на то, что в сильном электрическом поле излучение тяжелых и легких дырок неразлично [8]. Это не противоречит особенностям структуры валентной зоны германия [9].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы интенсивность и спектры излучения дырок, возбужденных импульсами электриче-

ского поля напряженностью до 12 кВ/см в германии с примесью Ga при одноосном сжатии кристаллов давлением  $P$  до 12 кбар.

Установлено, что спектры излучения дырок с участием локальных и резонансных состояний примесей имеют структуру, идентичную спектрам фотопроводимости и поглощения [2, 3].

Обнаружено, что интенсивность интегрального излучения дырок в электрическом поле напряженностью  $E$  менее 100 В/см сильно уменьшается при возрастании давления  $P$ . Отсюда следует, что при сжатии кристаллов излучение возникает при переходах тяжелых дырок. При  $E > 1$  кВ/см интенсивность излучения возрастает сверхлинейно при увеличении  $E$ , но не зависит от  $P$ . Излучение лежит в широкой области энергий. Спектры излучения при  $E = 3$  кВ/см при 0 и 12 кбар различаются незначительно. Отсюда следует, что в сильном электрическом поле различить вклад в излучение тяжелых и легких дырок не представляется возможным. Излучение наблюдается вплоть до энергий 140 мэВ и в нем проявляются переходы дырок с эмиссией ГА- и LO-фононов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 09-02-01538-а, 12-02-00646-а).

## ЛИТЕРАТУРА

1. М. С. Каган, И. В. Алтухов, В. П. Синис и др., РЭ **48**, 1137 (2003).
2. Я. Е. Покровский, Н. А. Хвальковский, Письма в ЖЭТФ **80**, 381 (2004).
3. Я. Е. Покровский, Н. А. Хвальковский, ФТП **39**, 187 (2005).
4. A. K. Ramdas and S. Rodrigues, Rep. Progr. Phys. **44**, 1278 (1981).
5. А. В. Андрианов, А. О. Захарьин, П. С. Алексеев и др., ЖЭТФ **142**, 1204 (2012).
6. Я. Е. Покровский, Н. А. Хвальковский, ФТП **44**, 1332 (2010).
7. V. N. Brockhouse, J. Phys. Chem. Sol. **8**, 400 (1957).
8. Я. Е. Покровский, Н. А. Хвальковский, Тез. X Российской конференции по физике полупроводников (Н. Новгород 2011), НГУ им. Н. И. Лобачевского (2011), с. 180.
9. C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, John Wiley & Sons, New York (1974), с. 381.