

Спектроскопия германия, легированного Ga, при одноосном сжатии

© Я.Е. Покровский[¶], Н.А. Хвальковский

Институт радиотехники и электроники Российской академии наук,
125009 Москва, Россия

(Получена 27 июля 2004 г. Принята к печати 12 августа 2004 г.)

Для идентификации оптических переходов, за счет которых в одноосно-сжатом германии, легированном галлием, возможно возбуждение длинноволнового стимулированного излучения, исследованы спектры поглощения и фотопроводимости этого материала в широком интервале давлений в направлениях [111] и [001]. Установлена зависимость величины расщепления ветвей легких и тяжелых дырок в германии от приложенного давления. Определенные из этой зависимости константы деформационного потенциала для валентной зоны оказались меньше принятых ранее значений. Установлено, что некоторые уровни возбужденных состояний примеси галлия при возрастании давления достигают зоны легких дырок, затем входят в зону и остаются вблизи ее края (резонансные состояния). Возможно, что инверсное заселение этих резонансных состояний приводит к возбуждению стимулированного излучения с энергией фотонов около 10 мэВ. Особенности в спектрах у края зоны тяжелых дырок, подтверждающих существование резонансных состояний примеси в этой области энергий, не обнаружено.

1. Введение

В работе [1] было обнаружено, а в [2–5] исследовано длинноволновое стимулированное излучение из кристаллов германия, легированного галлием в концентрации $N \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Излучение возникало в образцах, изготовленных в виде резонаторов полного внутреннего отражения при низких (4.2 К) температурах в сильном электрическом поле (2–4 кВ/см) и одноосном сжатии кристаллов под давлением $P = 4\text{--}10$ кбар. В работах [3–5] было предположено, что это явление связано с накоплением горячих дырок в резонансных состояниях примеси, уровни энергии которых смещаются при деформации в область непрерывного спектра к краю зоны тяжелых дырок. Расчеты [6–8] подтвердили возможность такого объяснения. Однако прямые эксперименты, указывающие на этот механизм инверсного заселения, нам не известны.

Существование состояний примесей в области непрерывного спектра носителей заряда связано со сложной зонной структурой полупроводников. Так, в спектрах поглощения [9] и фотопроводимости (PC — photoconductivity) Si проявляются пики, соответствующие переходам из основного состояния примесей акцепторов III группы $1S_{3/2}$ в состояния $2P_{1/2}$ и $3P_{1/2}$, связанные с ветвью валентной зоны, отщепленной спин-орбитальным взаимодействием. Эти пики смещены в область больших энергий относительно пиков основной серии $P_{3/2}$ на величину, близкую к спин-орбитальному расщеплению (44 мэВ), и уширены (≈ 0.5 мэВ) вследствие малого времени жизни. Оптические переходы между S -образными состояниями запрещены, и они проявляются лишь в рамановских спектрах. Так, в случае примеси бора оказалось, что состояние $1S_{1/2}$ локализовано в запрещенной полосе на расстоянии 23 мэВ от края валентной зоны [10]. Расчет [11] позволил получить

более близкое положение этого уровня для мелкого акцептора в Si.

Резонансные состояния примесей в Ge могут проявиться при одноосных деформациях кристаллов. Спектры поглощения акцепторами III группы в одноосно-сжатом Ge исследованы лишь при небольших давлениях $P < 0.5$ кбар (см. [12] и ссылки там же). При больших давлениях в направлении [001] исследована примесная PC германия, легированного галлием [13,14]. В работе [14] в спектрах PC отмечены позиции резонансных состояний вблизи края зоны тяжелых дырок, рассчитанные в [8]. Однако особенности, которые можно было бы связать с этими состояниями, в спектрах никак не проявляются. В настоящей работе исследованы спектры поглощения и PC Ge(Ga) в широком диапазоне деформаций сжатия, анализ эволюции которых позволил выявить некоторые резонансные состояния этой примеси.

2. Условия эксперимента

Исследовались образцы германия, легированного галлием в концентрации N от $1.5 \cdot 10^{15}$ до $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, размерами $1 \times 1 \times 10$ или $2 \times 2 \times 10$ мм, вырезанные вдоль направлений [111] и [001]. Некоторые образцы были изготовлены в виде резонаторов полного внутреннего отражения. Сжатие образцов производилось во вставке, состоявшей из двух коаксиальных труб из нержавеющей стали. Внешняя труба заканчивалась латунным цилиндром с каналом и окном, в котором размещался исследуемый образец. Усилие, создаваемое аттестованным динамометром и рычагом (1:3), передавалось на образец через внутреннюю трубку и латунный пуансон, скользящий в канале цилиндра. Второй изолирующий пуансон из капролона жестко фиксировался в канале. Образец точно центрировался в канале с помощью съемного шаблона и зажимался пуансонами между электродами из отожженной меди.

[¶] E-mail: yaep@mail.cplire.ru

При этом торцы образца оставляли отпечатки в электродах, фиксировавшие образец. Обычно на торцы образцов наносились контакты из сплава GaInSn, жидкого при комнатной температуре. При сжатии образца избыток сплава выдавливался из-под контактов. Шумы РС образцов с такими контактами определялись флуктуациями фона комнатной температуры. Для исследования поглощения и нормировки спектров РС за образцом размещалось фотосопротивление из германия, легированного Sb ($N_{\text{Sb}} \approx 10^{15} \text{ см}^{-3}$). Апертура фотоприемника была ограничена коротким тубусом сечением $0.8 \times 8 \text{ мм}^2$, находившимся в непосредственной близости от образца. Это исключало попадание на приемник излучения, не прошедшего через образец. Вставка погружалась в гелиевую ванну криостата (4.2 К). Окна ванны из плавленного (для области 7–12 мэВ) или кристаллического (для области 10–30 мэВ) кварца ограничивали интенсивность фонового излучения. Это позволило сильно увеличить пороговую фоточувствительность как приемника, так и исследуемых образцов. Спектры регистрировались с помощью фурье-спектрометра ЛАФС-1000 с лавсановыми светоделителями толщиной 12 и 6 мкм с разрешением 0.08 и 0.3 мэВ соответственно.

3. Экспериментальные результаты

В спектрах примесного поглощения и фотопроводимости проявляются только разрешенные оптические переходы из заселенных состояний. При низких температурах в германии, легированном акцепторами III группы, это переходы из низшей ветви $1S$ -состояния в P -образные состояния и валентную зону. Спектроскопические исследования поглощения могут дать информацию об энергетическом спектре, ограниченную этими условиями. Однако здесь необходимы образцы с достаточной оптической толщиной, т. е. либо с достаточно высокой концентрацией примеси, либо значительных размеров. При исследовании РС достаточно небольшого поглощения в образцах. С другой стороны, при фотоэлектрических исследованиях РС возникает только при возбуждении дырок в валентную зону или близкие к ней локальные состояния вследствие их фототермической ионизации. Кроме того, при возрастании давления напряженность электрического поля пробоя образцов сильно уменьшалась и при высоких давлениях не превышала 1 В/см. Поэтому исследование РС было корректным при напряжениях смещения не более 0.1–0.5 В, что создавало дополнительные трудности. Мы будем приводить результаты, полученные тем из методов, который оказался более эффективным.

На рис. 1 приведены спектры поглощения Ge(Ga) в области малых энергий при небольших давлениях P в направлении [111]. при $P = 0$ в спектре проявляются линии с энергиями $h\nu$ (мэВ): А (10.17), В (9.84), С (9.2) и D (8.44). Слабые длинноволновые линии Е (8) и F (6.74) не видны на рисунке. Учитывая то,

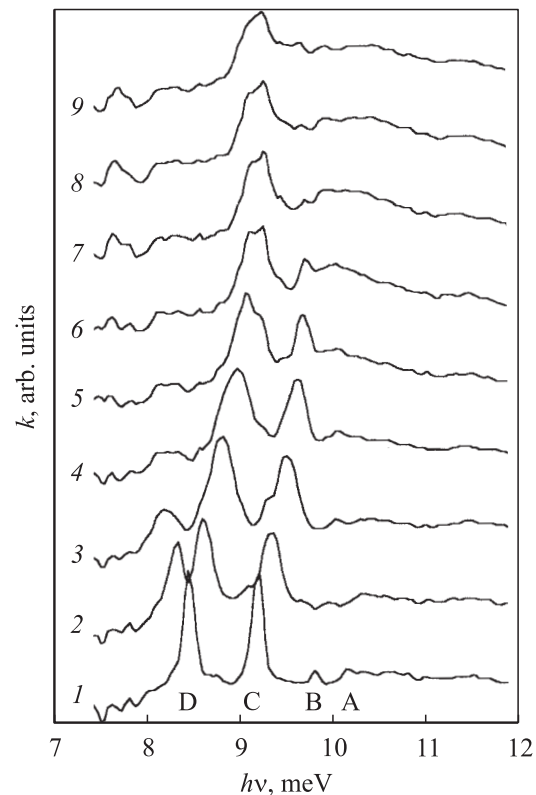


Рис. 1. Спектральные зависимости коэффициента поглощения k образца Ge ($2 \times 2 \times 10 \text{ мм}^3$), легированного Ga в концентрации $N = 1.4 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, при одноосном сжатии в направлении [111] под давлением P , кбар: 1 — 0, 2 — 0.23, 3 — 0.47, 4 — 0.7, 5 — 0.93, 6 — 1.16, 7 — 1.4, 8 — 1.6, 9 — 1.86.

что эти линии возникают при возбуждении дырок из основного состояния, мы будем обозначать соответствующие конечные состояния примеси теми же буквами. Энергию основного состояния примеси Ga в Ge обычно полагают равной 11.32 мэВ [9]. Однако край валентной зоны четко не определен, поскольку к нему примыкает квазинепрерывный спектр высоких возбужденных состояний. Энергию связи высокого возбужденного состояния можно достаточно точно рассчитать в приближении эффективной массы. Тогда энергию основного состояния можно принять равной сумме этой расчетной энергии и энергии линии при возбуждении соответствующего перехода. Теория оптического поглощения и фотоионизации акцепторов III группы в германии развита в работе [15].

При сжатии кристалла основное состояние примеси $1S$ расщепляется на нижнюю $1S_{1/2}$ и верхнюю $1S_{3/2}$ ветви. Состояние С не расщепляется, а состояние D слабо расщепляется при сжатии в направлении [111]. Раздвоение линии D, связанное с расщеплением основного состояния $1S$, видно до $P < 1$ кбар. По мере роста P термическая заселенность верхней ветви уменьшается и эта компонента исчезает. От линии С отделяется

слабая компонента смещающаяся в область меньших энергий, а сама линия С приближается к валентной зоне ($P \approx 1$ кбар), достигает ее края ($P \approx 1.2$ кбар) и входит в зону разрешенных энергий ($P \approx 1.5$ кбар). Видно, что одновременно с уменьшением интенсивности линии С возрастает поглощение на краю зоны легких дырок, а затем линия С превращается в широкую полосу (≈ 1 мэВ) в области непрерывного спектра, амплитуда которой уменьшается с ростом давления.

При последующем увеличении давления (рис. 2) линия D локализуется у края зоны легких дырок на расстоянии приблизительно 0.3 мэВ и смещается в область меньших энергий вместе с краем зоны из-за уменьшения энергии связи основного состояния $1S_{1/2}$. Однако при $P \approx 5$ кбар между линией D и краем зоны вновь возникает полоса, которая затем входит в зону и уширяется. Это может быть связано с расщеплением более глубоких возбужденных состояний E и F, верхние уровни энергии которых достигли края зоны легких дырок. Широкие полосы вблизи края зоны легких дырок хорошо видны и в спектрах РС (рис. 3). Пунктирами на рисунке отмечены энергии состояний С и D и полоса, возникающая при высоких давлениях (звездочка). Видно, что эти полосы незначительно смещаются в глубь зон легких дырок при возрастании давления.

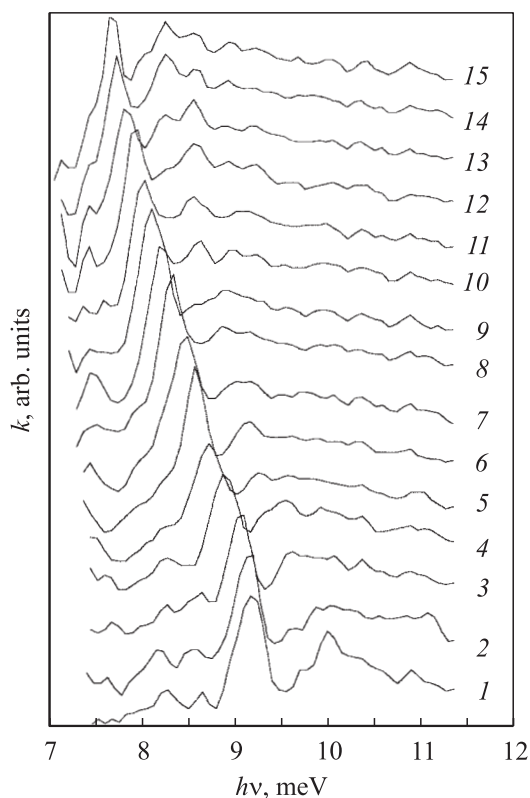


Рис. 2. Спектральные зависимости коэффициента поглощения k образца Ge(Ga) ($1 \times 1 \times 10 \text{ мм}^3$, $1.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), $[111] \parallel P$, кбар: 1 — 0.93, 2 — 1.4, 3 — 1.86, 4 — 2.3, 5 — 2.8, 6 — 3.3, 7 — 3.7, 8 — 4.2, 9 — 4.6, 10 — 5.1, 11 — 5.6, 12 — 6, 13 — 6.5, 14 — 7, 15 — 7.4.

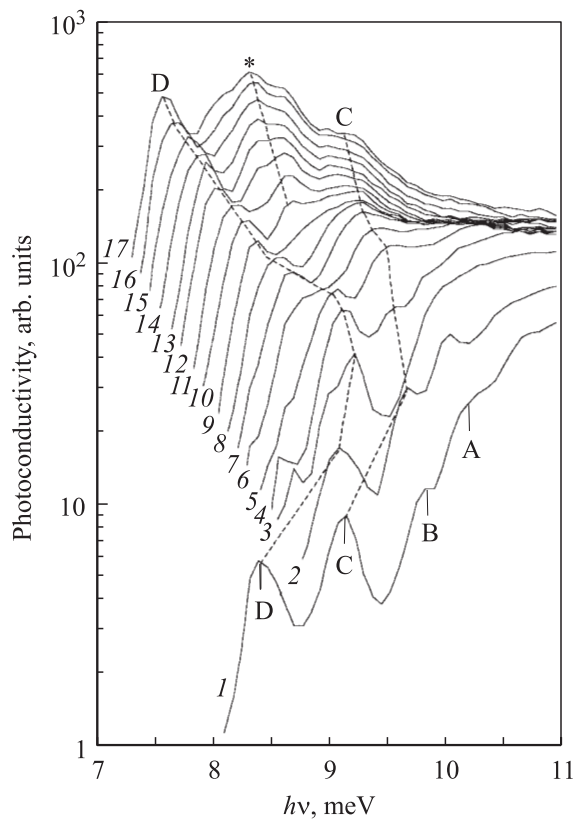


Рис. 3. Спектры фотопроводимости образца Ge(Ga) (резонатор $1 \times 1 \times 10 \text{ мм}^3$, $1.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), $[111] \parallel P$, кбар: 1 — 0, 2 — 0.47, 3 — 0.93, 4 — 1.4, 5 — 1.86, 6 — 2.3, 7 — 2.8, 8 — 3.3, 9 — 3.7, 10 — 4.2, 11 — 4.6, 12 — 5.1, 13 — 5.6, 14 — 6, 15 — 6.5, 16 — 7, 17 — 7.4. Пунктиром отмечены энергии состояний С, D и неидентифицированного состояния (звездочка).

Расщепление валентной зоны на подзоны легких и тяжелых дырок хорошо прослеживается как в спектрах поглощения, так и в спектрах РС. В образцах с концентрацией галлия $N \approx 10^{14} \text{ см}^{-3}$ поглощение мало в области больших энергий, и поэтому мы приводим результаты исследования РС (рис. 4). Из рисунка видно, что при энергиях 10–30 мэВ с ростом давления спектры последовательно выходят на общую зависимость от энергии фотонов, обусловленную легкими дырками. От этой монотонно падающей кривой при энергиях, достаточных для возбуждения носителей заряда в зону тяжелых дырок, ответвляются участки возрастания РС. Точки ветвления, соответствующие минимуму РС, смещаются в область больших энергий пропорционально приложенному давлению, а затем ветви выходят на общую зависимость, соответствующую РС при $P = 0$. Особенности в этой спектральной области, указывающих на проявление резонансных состояний, обнаружить не удалось. Аналогичные результаты были получены при исследовании поглощения в образце с более высокой ($1.5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$) концентрацией Ga. Линии поглощения в этом образце были заметно уширены, и поэтому

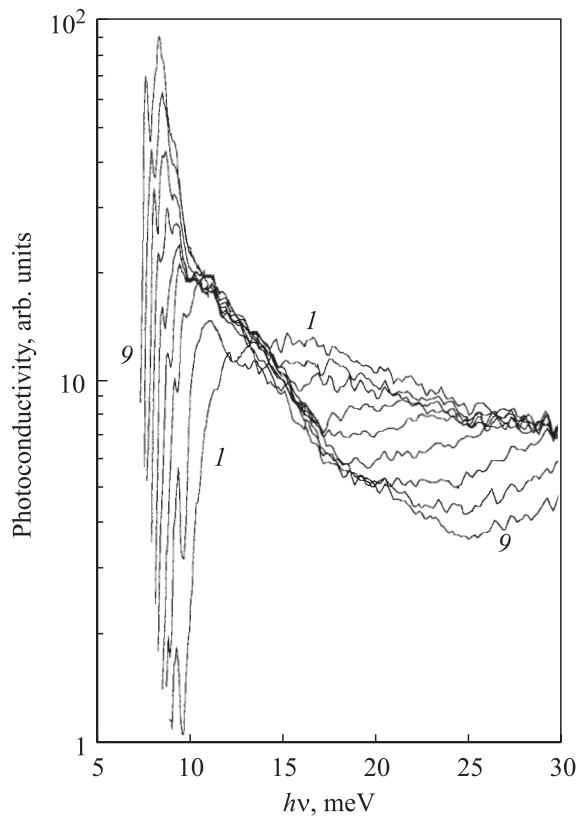


Рис. 4. Спектры фотопроводимости образца Ge(Ga) (резонатор $1 \times 1 \times 10 \text{ мм}^3$, $1.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), $[111] \parallel \mathbf{P}$ от 0 (спектр 1) до 7.4 кбар (спектр 9) с шагом 0.93 кбар.

минимумы между линией D и областью непрерывного спектра были не столь четко выражены. Однако соответствие характерных особенностей в этих спектрах поглощения и спектрах РС слабо легированных образцов было достаточно хорошим.

При сжатии в направлении $[001]$ использовались образцы с концентрацией $N \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, в которых поглощение мало во всей области непрерывного спектра. Поэтому на рис. 5 представлены спектры РС. Спектры аналогичны приведенным на рис. 4, но изменяются сильнее при возрастании давления P . Видно, что с ростом P спектры последовательно выходят на единую зависимость, определяемую легкими дырками. Далее следует область ветвления, отвечающая началу переходов в зону тяжелых дырок. Затем ветви выходят на общую зависимость РС при $P = 0$. Никаких локальных особенностей в этой спектральной области не обнаружено. Вблизи края фотопроводимости спектры РС аналогичны приведенным на рис. 3. Как и при сжатии в направлении $[111]$, здесь проявляются пики фототермической ионизации состояний B, C и D. Затем с ростом давления состояния B и C входят в зону легких дырок, трансформируясь в широкие полосы вблизи ее края. Состояние D приближается к краю зоны, но не входит в нее, а смещается в область меньших энергий из-за уменьшения энергии низшего состояния примеси $1S_{1/2}$.

Отметим, что положение точек ветвления не зависело от ориентации электрического поля и качества обработки поверхности образцов. Однако на форму ветвей эти факторы существенно влияли. На вставке к рис. 5 показан участок спектра РС для одного и того же кристалла. В первом случае образец имел точную обработку резонатора полного внутреннего отражения. Во втором был использован шлифованный образец. В третьем случае токовые контакты были нанесены на боковые грани резонатора после их обработки тонким абразивом, а электрическое поле приложено в направлении $[100]$ нормально к направлению деформации $[001]$. Видно, что вид ветвей при переходе РС от области легких к области тяжелых дырок в этих трех случаях не одинаков. Небольшое различие, связанное с ориентацией электрического и деформационного полей, можно объяснить анизотропией одноосно-сжатого кристалла. Однако сильное влияние обработки поверхности оказалось неожиданным. Аналогичное сильное различие спектров РС (в области ветвления) в хорошем и испорченном резонаторах наблюдалось и при сжатии кристаллов в направлении $[111]$.

4. Обсуждение результатов

Анализ спектров поглощения и фотопроводимости, представленных на рис. 1–5, дает возможность построить спектр энергий дырок в германии, легированном галлием, при одноосном сжатии и выяснить ряд его важных особенностей.

За состояние с нулевой энергией примем положение края валентной зоны при давлении $P = 0$. Построение энергетической диаграммы заключается в определении положения особенностей в экспериментальных спектрах относительно этой новой точки отсчета. Давление симметрично расщепляет валентную зону на ветви легких $VB_{1/2}$ и тяжелых $VB_{3/2}$ дырок на величину $\Delta \propto P$ [16]. Поскольку точное положение края валентной зоны неизвестно, естественно отсчитывать его от минимума, ближайшего к длинноволновой границе непрерывного спектра. Такой единственный минимум за линией D четко виден в спектрах РС при $[111] \parallel \mathbf{P} > 2$ и $[001] \parallel \mathbf{P} > 1.5$ кбар. Тогда Δ можно определить как разность энергий в этом минимуме и в минимуме у точки ветвления. Минимумы у точек ветвления более четко выражены в спектрах РС шлифованных образцов (см. вставку на рис. 5). Поэтому при определении энергий в минимумах мы использовали и такие спектры.

В этих приближениях на рис. 6 построен спектр дырочных состояний Ge(Ga) при одноосном сжатии в направлениях $[111]$ и $[001]$. Поскольку энергии ветвей легких и тяжелых дырок можно определить лишь при значительных давлениях, на рис. 6 экспериментальные значения линейно экстраполированы в область малых давлений (пунктирные прямые). Пересечение этих прямых при $P = 0$ подтверждает корректность такой экстраполяции. Из рис. 6 следует, что расщепление валентной

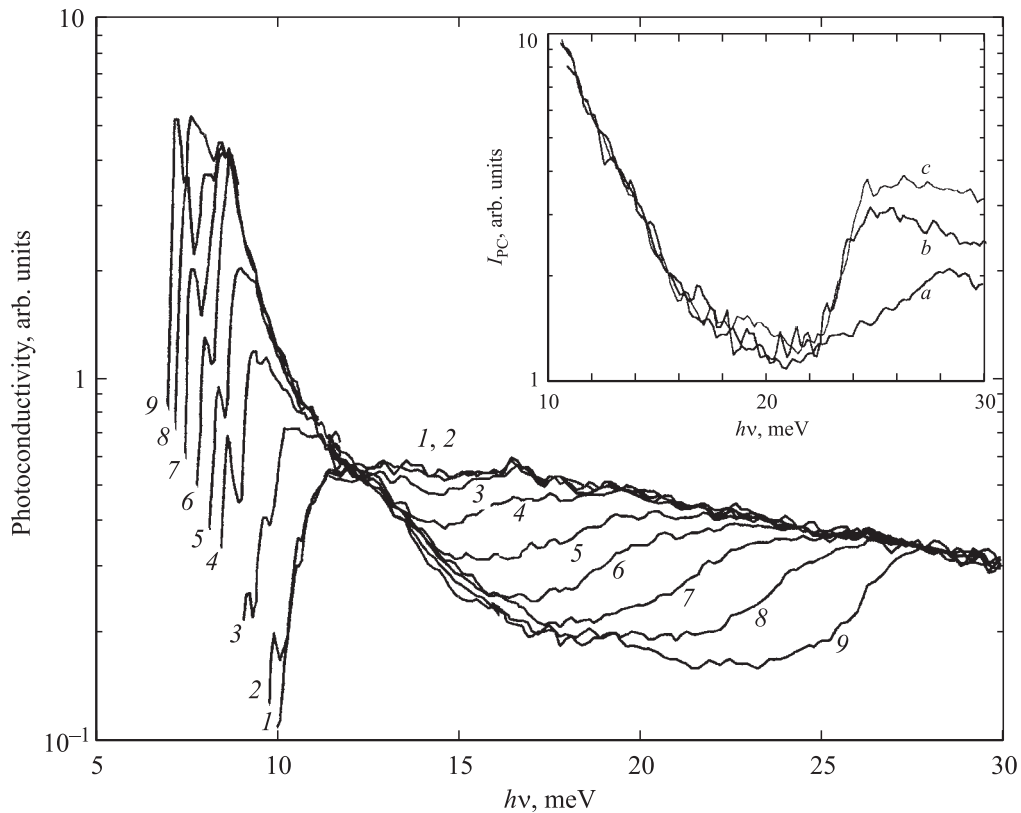


Рис. 5. Спектры фотопроводимости образца Ge(Ga) (резонатор $1 \times 1 \times 10 \text{ мм}^3$, $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$), $[001] \parallel \mathbf{P}$, кбар: 1 — 0, 2 — 0.93, 3 — 1.4, 4 — 1.86, 5 — 2.3, 6 — 2.8, 7 — 3.3, 8 — 3.7, 9 — 4.2. На вставке — спектры фотопроводимости того же образца при $P = 4.2$ кбар: *a* — резонатор, электрическое поле $\mathbf{E} \parallel \mathbf{P}$; *b* — шлифованный образец, $\mathbf{E} \parallel \mathbf{P}$; *c* — образец с контактами на боковых гранях, $\mathbf{E} \perp \mathbf{P}$.

зоны германия Δ пропорционально давлению:

$$\Delta_{111} = 2.5P [\text{мэВ/кбар}] = d0.58S_{44}P,$$

$$\Delta_{001} = 3.65P [\text{мэВ/кбар}] = 2b(S_{11} - S_{12})P. \quad (1)$$

Здесь b и d — константы деформационного потенциала, S_{44} , S_{11} и S_{12} — коэффициенты податливости германия [16,17]. Из (1) следует, что $d = 2.9$ эВ, $b = 1.45$ эВ. Полученные нами константы деформационных потенциалов по крайней мере на 30–40% меньше приводимых в литературе [12,16,17]. Однако в данной работе эти величины определены из прямых экспериментов по расщеплению ветвей валентной зоны в широком диапазоне внешних давлений. Воспроизводимость результатов была хорошей, и мы не видим источника систематических ошибок, который мог бы привести к такому расхождению.

Энергии состояний 1S, C и D при $P = 0$ отмечены на рис. 6 согласно [9]. При возрастании давления P в направлениях $[111]$ и $[001]$ эволюция возбужденных состояний несколько различается. Однако в конце концов состояния C и D приближаются к краю зоны легких дырок, но C входит в область непрерывного спектра, а D остается за его краем. Что касается состояния, отмеченного на рис. 3 и 6 звездочками, то мы не считаем

возможным связывать его с каким-то определенным глубоким состоянием примеси. Еще раз подчеркнем, что все состояния, вошедшие в область непрерывного спектра энергий, незначительно смещаются в глубь зоны легких дырок при возрастании деформации. Отдельно следует остановиться на расщеплении основного состояния 1S. Его зависимость от давления можно проследить по раздвоению синглетной линии D до тех пор, пока верхняя ветвь $1S_{3/2}$ заселена. При 4.2 К это возможно до $P \approx 1$ кбар (точки на рис. 6). Полагая, что расщепление состояния 1S пропорционально P , можно экстраполировать его верхнюю ветвь в область более высоких давлений. Такая процедура в значительной степени произвольна, тем более что определение коэффициента пропорциональности в области малых P не может быть точным. Из рис. 6 следует, что этот коэффициент близок к 1.3 мэВ/кбар. Отметим, что отношение величин расщепления 1S-состояния и ветвей валентной зоны (0.53) весьма близко к отношению, рассчитанному в [18]. При экстраполяции смещения уровня сообразно найденному коэффициенту (пунктир на рис. 6) видно, что состояние $1S_{3/2}$ сближается с зоной легких дырок при $P \approx 5$ –6 кбар. Вряд ли можно ожидать, что при дальнейшем небольшом возрастании

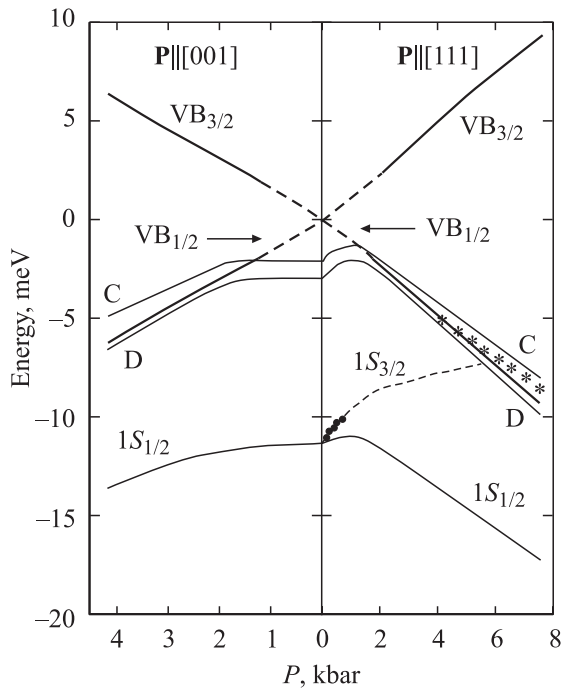


Рис. 6. Эволюция энергетического спектра Ga(Ga) при одноосном сжатии кристаллов в направлениях [111] и [001] под давлением P . $VB_{1/2}$ и $VB_{3/2}$ — ветви зон легких и тяжелых дырок; $1S_{1/2}$, D и C — энергетические уровни основного и возбужденных состояний примеси. Точки — уровень $1S_{3/2}$ из рис. 1. Звездочки — неидентифицированное резонансное состояние. Пунктир — экстраполяции экспериментальных данных в области малых и больших давлений.

давления до 7–8 кбар энергия этого состояния окажется близкой к краю зоны тяжелых дырок $VB_{3/2}$.

Как уже отмечалось, в области энергий 10–30 мэВ никаких особенностей, связанных с проявлением резонансных состояний примеси Ga, обнаружить не удалось. Более того, обнаруженные нами резонансные состояния лежат в области непрерывного спектра вблизи края зоны легких дырок. Этот экспериментальный результат противоречит расчетам [5–7], согласно которым резонансные состояния акцепторов лежат у края зоны тяжелых дырок. Однако резонансные состояния у края зоны легких дырок также достаточно интересны. Так, накопление дырок в этих состояниях может отвечать за возбуждение стимулированного излучения при $P = 3.9$ кбар в направлении [001] и $h\nu \approx 10$ мэВ сразу после пробоя примеси Ga [19]. Эта энергия близка к разности энергий между основным $1S_{1/2}$ и резонансным состоянием C при том же значении P (рис. 6).

5. Заключение

Для выяснения возможной роли резонансных состояний примеси галлия в германии при возбуждении стимулированного излучения исследованы спектры примесного поглощения и фотопроводимости этого материала

при одноосном сжатии. В результате анализа эволюции спектров установлена зависимость величины расщепления зон легких и тяжелых дырок от давления в диапазоне от 0 до 7.5 кбар в направлении [111] и до 4.2 кбар в направлении [001]. Константы деформационных потенциалов валентной зоны $b = 1.45$ эВ и $d = 2.9$ эВ, определенные из этих экспериментов, оказались меньше принятых ранее величин. Показано, что при возрастании давления некоторые локальные уровни энергии примеси галлия сближаются с зоной легких дырок, а затем входят в зону и остаются вблизи ее края, проявляясь в виде широких (≈ 1 мэВ) полос. Возможно, что при пробое примеси галлия инверсное заселение этих резонансных состояний приводит к возбуждению стимулированного излучения в области 10 мэВ. Проявления резонансных состояний примеси вблизи края зоны тяжелых дырок, существование которых следовало из некоторых расчетов, обнаружить не удалось. Мы полагаем, что вопрос о возможной роли резонансных состояний может быть выяснен при исследовании спектров фотопроводимости и поглощения в идентичных условиях спонтанного и стимулированного излучений.

Авторы благодарны В.П. Синису за содействие в проведении экспериментов, И.В. Алтухову, М.С. Кагану и А.Ф. Полупанову за обсуждение результатов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-02-16891) и EOARD (грант ISTC 2206р).

Список литературы

- [1] И.В. Алтухов, М.С. Каган, В.П. Синис. Письма ЖЭТФ, **47**, 136 (1988).
- [2] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев и др. ЖЭТФ, **101**, 756 (1992).
- [3] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев и др. Письма ЖЭТФ, **59**, 455 (1994).
- [4] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев и др. ФТП, **30**, 1091 (1996).
- [5] И.В. Алтухов, М.С. Каган, К.А. Королев и др. ЖЭТФ, **115**, 89 (1999).
- [6] М.А. Одноблюдов, А.А. Пахомов, В.М. Чистяков и др. ФТП, **31**, 1180 (1997).
- [7] М.А. Одноблюдов, А.А. Прокофьев, И.Н. Ясневич. ЖЭТФ, **121** 692 (2002).
- [8] В.Я. Алешкин, В.И. Гавриленко, Д.В. Козлов. ЖЭТФ, **120**, 1495 (2001).
- [9] A.K. Ramdas, S. Rodrigues. Rep. Progr. Phys., **44**, 1287 (1981).
- [10] G.B. Wright, A. Mooradian. Phys. Rev. Lett., **18**, 608 (1967).
- [11] O.L. Lipari, A. Baldareschi. Sol. St. Commun., **25**, 665 (1978).
- [12] R.L. Jones, P. Fiser. Phys. Rev. B, **2**, 2016 (1970).
- [13] A.G. Kazanskii, P.L. Richards, E.E. Haller. Appl. Phys. Lett., **21**, 496 (1977).
- [14] V.Y. Aleshkin, A.V. Gavrilenko, V.I. Gavrilenko et al. Phys. Status Solidi (c), **0**, 680 (2003).
- [15] Ш.М. Каган, А.Ф. Полупанов. ЖЭТФ, **80**, 394 (1981).

- [16] Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. *Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках* (М., Наука, 1972).
- [17] П.И. Баранский, В.П. Клочков, И.В. Потыкевич. *Полупроводниковая электроника. Справочник* (Киев, Наук. думка, 1975) с. 8, 129.
- [18] А.Ф. Полупанов, Р. Таксинбаев. *ФТП*, **18**, 279 (1984).
- [19] Yu.P. Gousev, I.V. Altukhov, E.G. Chirkova et al. *Appl. Phys. Lett.*, **75**, 757 (1999).

Редактор Т.А. Полянская

A spectroscopic study of Ga-doped Ge, under uniaxial pressure

Ya.E. Pokrovskii, N.A. Khvalkovskii

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

Abstract To identify optical transitions responsible for the excitation of a longwave stimulated radiation in a Ga-doped uniaxially compressed Ge, the optical absorption and photoconductivity spectra of the material were investigated in a wide range of the pressure in [111] and [001] directions. The dependence of the valence band splitting between the branches of light and heavy holes in Ge as a function of the applied pressure was found. Constants of deformation potential for valence band were determined from the dependence. The constants appeared to be less than the earlier known ones. It has been established that some of the Ga impurity excited states with the pressure increase reach the light holes band and penetrating into that remain close to its edge (the resonant states). It is possible that the inversion population of the resonant states leads to an excitation of the stimulated radiation with the photon energy close to 10 meV. No peculiarities have been found in the spectra confirming the existence of resonant impurity states near the edge of the heavy hole band.