

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА $V_{Ga}Sn_{Ga}$ В GaAs МЕТОДАМИ ПОЛЯРИЗОВАННОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И ПЬЕЗОСПЕКТРОСКОПИИ

II. ЯВЛЕНИЕ ДВУХСТУПЕНЧАТОГО ВЫСТРАИВАНИЯ

А. А. Гуткин, М. А. Рещиков, В. Р. Сосновский

Физико-технический институт им. А. О. Иоффе Российской академии наук, 194021, Санкт-Петербург, Россия

(Получена 5 марта 1993 г. Принята к печати 13 апреля 1993 г.)

Наблюдаемая при температуре 2 К и одноосном давлении вдоль направления [111] или [110] двухступенчатая зависимость поляризации фотолюминесценции комплекса $V_{Ga}Sn_{Ga}$ в GaAs от величины давления объяснена появлением при значениях давления, превосходящих некоторую критическую величину, дополнительного выстраивания, происходящего в группе комплексов $V_{Ga}Sn_{Ga}$ с определенной ориентацией исходной оси $V_{Ga}-Sn_{Ga}$ относительно направления давления. Такое выстраивание происходит при подавлении внешней одноосной деформацией возмущения состояния вакансии Ga, вызываемого атомом Sn, находящимся в ближайшем V_{Ga} узле подрешетки Ga. Обсуждены возможные причины отсутствия двухступенчатого выстраивания в комплексах $V_{Ga}Te_{As}$.

1. Введение

В предыдущей работе [1] были проведены результаты исследований фотолюминесценции (ФЛ) комплекса $V_{Ga}Sn_{Ga}$ (где V_{Ga} — вакансия Ga) в n -GaAs при одноосных давлениях или при возбуждении поляризованным светом. Поляризационные диаграммы, а также зависимости поляризации этой ФЛ от величины одноосного давления в диапазоне 0—4 кбар оказались подобными соответствующим характеристикам для комплекса $V_{Ga}Te_{As}$ [2—4] и были объяснены, как и для комплекса $V_{Ga}Te_{As}$, в модели частично переориентирующихся центров триклинной симметрии. Качественное различие в поведении комплексов $V_{Ga}Te_{As}$ и $V_{Ga}Sn_{Ga}$ проявилось при одноосных давлениях свыше 4—5 кбар. Оно заключалось в появлении при определенных направлениях одноосного давления второй ступени в зависимостях поляризационного отношения ФЛ комплекса $V_{Ga}Sn_{Ga}$ от величины давления при $T = 2$ К (рис. 3 в [1]). В настоящей работе обсуждается природа этого явления.

2. Возможные механизмы двухступенчатого выстраивания комплексов $V_{Ga}Sn_{Ga}$

Модель, описывающая особенности поведения ФЛ $V_{Ga}Sn_{Ga}$ при одноосных давлениях $P = (0 \div 4)$ кбар [1], предполагает, что триклинная симметрия центра может быть получена посредством суперпозиции трех (или двух) компонент искажения исходной T_d -симметрии решетки в области вблизи дефекта. Одна из этих компонент может быть связана с исходной анизотропией пары $V_{Ga}-Sn_{Ga}$, направлена вдоль ее оси (кристаллографическое направление $\langle 110 \rangle$ для $V_{Ga}Sn_{Ga}$) и для каждого центра является фиксированной. Эта компонента вместе с другой

фиксированной компонентой¹, направление которой выбрано вдоль оси типа $\langle 001 \rangle$, задает плоскость фиксированных искажений. В зависимости от взаимного расположения фиксированных компонент эта плоскость может быть плоскостью $\{110\}$ или $\{001\}$. Третья компонента направлена вдоль одной из осей типа $\langle 111 \rangle$, перпендикулярных направлению компоненты вдоль оси $\langle 110 \rangle$, имеет две эквивалентные ориентации в каждом центре и способна переориентироваться при низкой температуре. Экспериментальные результаты [1] в области одноосных давлений 0—4 кбар могли быть объяснены как в предположении о существовании комплексов с плоскостью фиксированных искажений одного типа, так и в предположении об одновременном существовании центров обоих типов, если их энергии близки. В силу низкой симметрии подобных центров их возбужденные состояния невырождены даже в отсутствие одноосного давления. В рамках подобной модели повторное резкое увеличение поляризации ФЛ комплекса $V_{Ga}Sn_{Ga}$ при некоторой величине одноосного давления (~ 5 кбар), сопровождаемое вторым участником «насыщения», может происходить за счет дополнительного выстраивания части излучающих центров. Чисто формально можно выделить два различных механизма этого выстраивания.

Один из механизмов связан с возможностью ориентации при определенных величинах и направлениях внешнего давления переориентирующейся компоненты искажения вдоль одного из направлений типа $\langle 111 \rangle$, составляющих с направлением компоненты вдоль оси $\langle 110 \rangle$ угол, отличный от прямого. В отсутствие давления и при небольшой величине сжатия подобная взаимная ориентация компонент искажения энергетически невыгодна и поэтому не реализуется. Однако в условиях внешнего давления вдоль определенных кристаллографических осей такая ориентация компонент может оказаться более выгодной для некоторых центров, что приведет к их быстрому выстраиванию при низких температурах. Поляризация ФЛ этих центров изменится (скачком при $T \rightarrow 0$), что проявится в резком изменении интегрального поляризационного отношения излучения r^* . Характерной особенностью рассматриваемого механизма является то, что в результате дополнительного выстраивания симметрия части центров повышается (от триклинной до моноклинной).

Другой механизм связан с переориентацией в некоторых центрах при определенных величинах и направлениях внешнего давления компоненты искажения, которая при меньших давлениях и в его отсутствие была фиксированной. В рассматриваемой модели центра таким искажением может быть искажение вдоль оси $\langle 001 \rangle$. В результате такого рода переориентации взаимная ориентация первоначально фиксированных искажений меняется, что может привести к изменению типа плоскости фиксированных искажений.

Естественно, что как в первом, так и во втором случае энергетические барьеры между конфигурациями комплекса с различными направлениями переориентирующихся компонент искажений должны быть невелики (по крайней мере при величинах давления, соответствующих их выстраиванию) для того чтобы время выстраивания было достаточно малым.

3. Результаты расчетов

Определение энергий различных конфигураций комплексов $V_{Ga}Sn_{Ga}$ и вычисление зависимости поляризации их ФЛ от величины одноосного давления для каждого из указанных механизмов дополнительного выстраивания были проведены в примененной ранее модели [1]. Такая модель, использующая феноменологический гамильтониан [2], описывает локальные искажения кристаллической решетки вблизи дефекта как суперпозицию одноосных деформаций.

¹ Вторая компонента фиксированного искажения может отсутствовать [1].

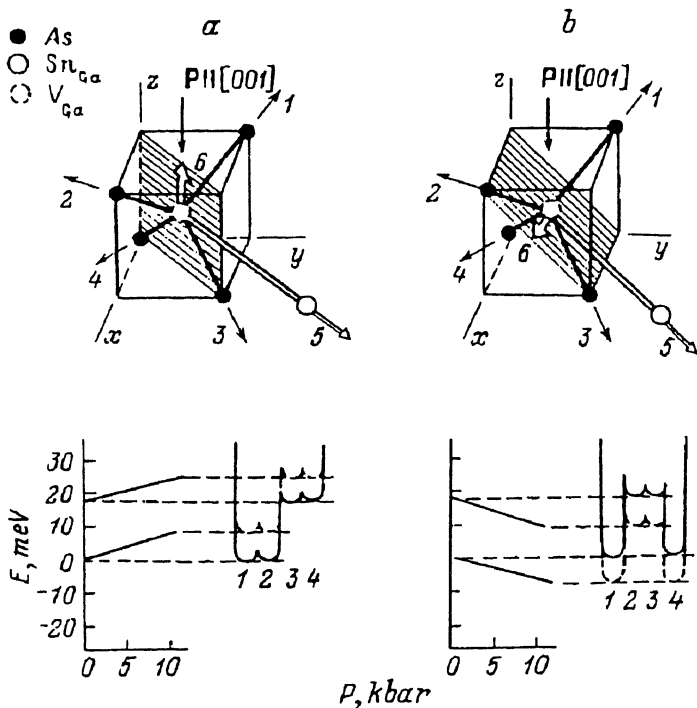


Рис. 1. Характерные ориентации комплекса $V_{Ga}Sn_{Ga}$ относительно внешнего давления, направленного вдоль оси $[111]$, и энергии возбужденного состояния комплекса, отвечающие этим ориентациям, в зависимости от величины давления. a, b — разные типы ориентации плоскости фиксированного искажения относительно направления внешнего давления. Стрелки 1–6 указывают (условно) направления переориентирующейся (1–4) и фиксированных (5, 6) компонент искажения симметрии решетки в области комплекса: 1 — $[\bar{1}\bar{1}1]$, 2 — $[1\bar{1}\bar{1}]$, 3 — $[11\bar{1}]$, 4 — $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$, 5 — $\langle 110 \rangle$, 6 — $\langle 001 \rangle$. x, y, z — оси координат. Расчетные зависимости энергий (E) возбужденного состояния комплексов с различной ориентацией компонент искажения относительно направления P от величины внешнего давления приведены для следующих значений параметров модели комплекса: $\delta_{111} = 125$ мэВ, $\delta_{001} = -80$ мэВ, $\delta_{110} = -20$ мэВ, $\Delta_{50} = 400$ мэВ, $b = -1.1$ эВ, $d = -3.4$ эВ. Рядом схематически изображены адиабатические потенциалы для случаев $P = 0$ (сплошная линия) и $P = 10$ кбар (штриховая); цифры 1–4 под минимумами адиабатических потенциалов соответствуют направлениям переориентирующейся компоненты искажения комплекса в этих минимумах.

Рассмотрим наиболее простой случай, соответствующий первому механизму выстраивания в модели комплексов с плоскостью фиксированных искажений типа $\{110\}$ [1]. Этот механизм требует анализа изменений энергии возбужденного состояния комплекса в конфигурациях, соответствующих всем четырем (а не двум, как в [1]) направлениям переориентирующейся компоненты искажений: $[\bar{1}\bar{1}1]$, $[1\bar{1}\bar{1}]$, $[11\bar{1}]$ и $[\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$. Результаты расчета энергий состояний комплексов с этими конфигурациями показаны на рис. 1–3. Расчеты проводились при величинах параметров модели центра, приведенных в работе [1], которые позволяют получить хорошее количественное согласие расчетных и экспериментальных поляризационных диаграмм ФЛ комплекса при $P = C$ и качественно описывают поведение поляризации ФЛ при $P \leq 4$ кбар. На этих же рисунках показаны возможные ориентации комплексов относительно внешнего давления, направленного вдоль различных кристаллографических осей.

Исходно (в отсутствие искажения, вводимого Sn_{Ga}) четыре конфигурации, соответствующие четырем ориентациям переориентирующейся компоненты иска-

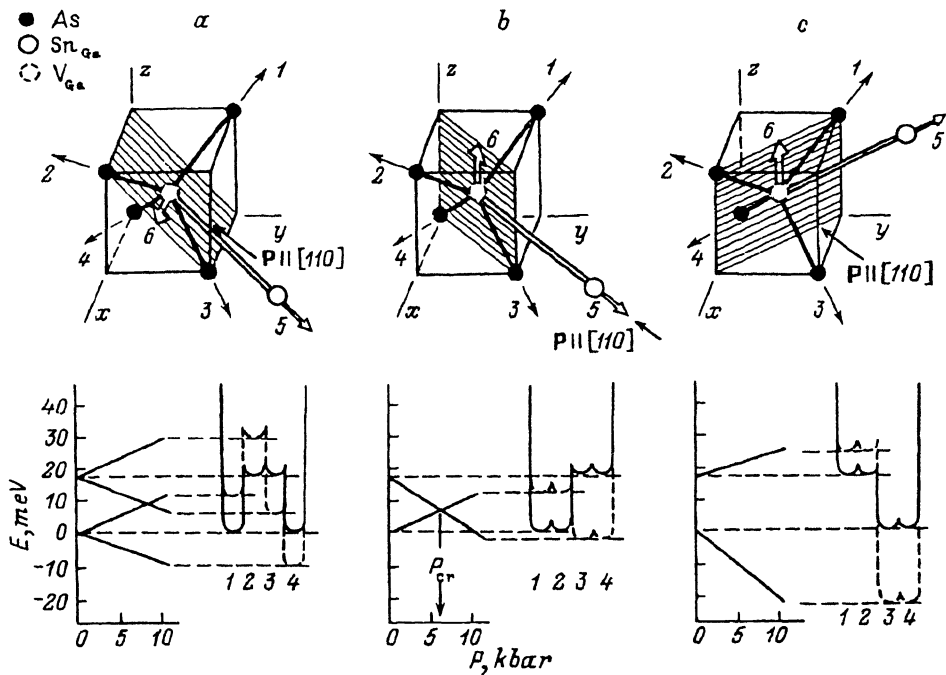


Рис. 2. Характерные ориентации комплекса $V_{Ga}Sn_{Ga}$ относительно внешнего давления, направленного вдоль оси $[110]$, и энергии возбужденного состояния комплекса, отвечающие этим ориентациям, в зависимости от величины давления. a, b, c — разные типы ориентации плоскости фиксированного искажения относительно направления внешнего давления. Обозначения и величины параметров модели при расчете те же, что и на рис. 1.

жения (эту компоненту можно связать с искажением вакансии), должны иметь одинаковую энергию. Влияние Sn_{Ga} делает эти конфигурации энергетически неэквивалентными. Если это влияние, как и в [1], описывать одноосной деформацией вдоль оси $\langle 110 \rangle$, то будет два типа конфигураций с различными при $P = 0$ энергиями. Как показывают расчеты, конфигурации, в которых переориентирующаяся компонента лежит в плоскости фиксированных искажений, имеют более высокую энергию, чем две другие (рис. 1—3)². Вычисленные изменения энергий для центров, различно ориентированных относительно внешнего давления, показаны на рис. 1—3.

Обсудим результаты расчетов в случаях одноосного давления вдоль оси $[111]$ (рис. 1) и вдоль оси $[110]$ (рис. 2). При слабом внешнем давлении в центрах определенной ориентации относительно направления давления (рис. 1, $a, 2, a$) наиболее энергетически выгодные при $P = 0$ конфигурации (отвечающие направлениям переориентирующейся компоненты, не лежащим в плоскости фиксированных искажений) перестают быть эквивалентными. Эти центры будут выстраиваться при низкой температуре, что приведет к появлению первой ступени в зависимости $r^*(P)$ вблизи точки $P = 0$. В центрах с другой ориентацией относительно направления давления (рис. 1, $b, 2, b, c$) при низких давлениях указанные выше конфигурации остаются наиболее низкоэнергетичными и при этом они эквивалентны друг другу. Выстраивание в центрах с таким типом ориентации относительно оси давления не происходит. Однако по достижении

² Более высокоэнергетические конфигурации могут оказаться неэквивалентными при учете реальной анизотропии ближайшего окружения комплекса. Мы вернемся к этому вопросу далее.

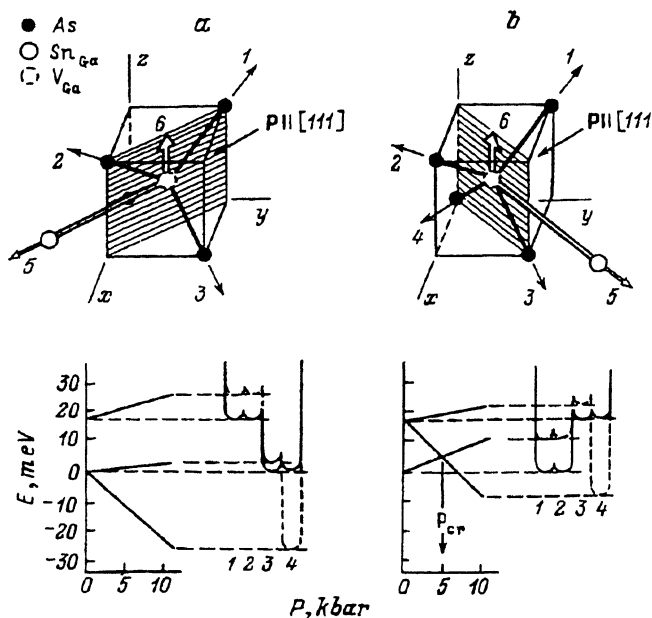


Рис. 3. Характерные ориентации комплекса $VGaSnGa$ относительно внешнего давления, направленного вдоль оси $[001]$, и энергии возбужденного состояния комплекса, отвечающие этим ориентациям, в зависимости от величины давления. a, b — разные типы ориентации плоскости фиксированного искажения относительно направления внешнего давления. Обозначения и величины параметров модели при расчете те же, что и на рис. 1—2.

некоторой величины внешнего давления (P_{cr}) для центров с ориентацией, показанной на рис. 1, a и 2, a , энергетически более выгодными становятся направления переориентирующейся компоненты, лежащие в плоскости фиксированных искажений. В результате может произойти выстраивание и изменение симметрии этой группы центров. Поляризация ФЛ от таких центров резко изменится, что проявится в появлении второй ступени в низкотемпературной зависимости r^* (P) вблизи точки $P = P_{cr}$.

В случае давления вдоль оси $[001]$ (рис. 3) энергии состояний, отвечающих двум направлениям переориентирующейся компоненты искажения, не лежащим в плоскости фиксированных искажений, равны в каждом комплексе независимо от его ориентации относительно направления P и при любых величинах давления остаются наименьшими, т. е. выстраивания и изменения симметрии центров не происходит.

Расчетные зависимости интегрального поляризационного отношения ФЛ от величины давления r^* (P) при температурах 6 и 77 К приведены на рис. 4. Как видно из сопоставления с экспериментальными результатами, расчеты воспроизводят основные особенности экспериментальных зависимостей r_m^* (P) [1]. В случаях $P \parallel [111]$ и $P \parallel [110]$ при $T = 6$ К имеются участки резкого роста r^* вблизи $P = 0$ и $P \approx 5$ кбар, вызываемые соответственно первым и дополнительным выстраиванием центров. Эти участки сменяются участками относительно медленного роста r^* , вызванного изменением волновых функций возбужденного состояния комплексов под влиянием давления. При $T = 77$ К зависимости r^* (P) почти линейны в диапазоне $P = 0 \div 10$ кбар, что связано с относительно медленным увеличением степени выстраивания центров. В случае $P \parallel [001]$ линейная зависимость r^* (P) наблюдается во всем диапазоне давлений и одинакова при любых температурах, поскольку определяется только изменением волновой функции возбужденного состояния.

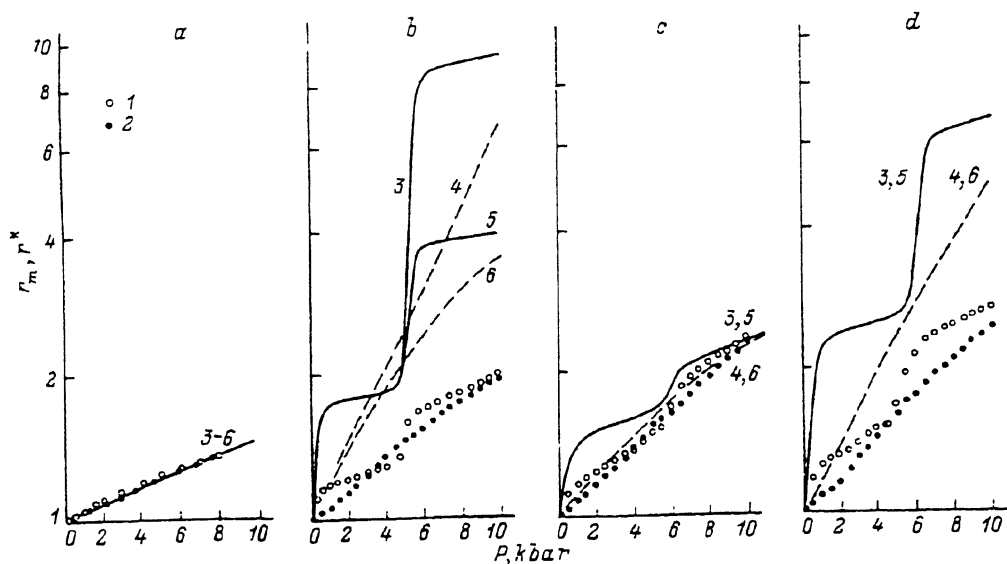


Рис. 4. Зависимости поляризационного отношения ФЛ от величины одноосного давления. Направление давления: *a* — [001], *b* — [111], *c*, *d* — [110]. Направление наблюдения ФЛ: *c* — [110], *d* — [001]. 1, 2 — экспериментальные значения r_m . (3—6) — расчетные зависимости $r^*(P)$ с учетом одной (5, 6) или двух эквивалентных (3, 4) конфигураций с направлениями переориентирующейся компоненты искажения, лежащими в плоскости фиксированного искажения. Значения параметров модели те же, что и на рис. 1—3. *T*, К: 1—2; 3, 5—6; 2, 4, 6—77.

Количественное согласие теории с экспериментом в случае $P \parallel [111]$ можно улучшить, несколько усовершенствовав модель. Действительно, искажения симметрии решетки в области комплекса связаны с присутствием примесного атома и смещениями собственных атомов кристалла и могут не описываться адекватно локальными одноосными деформациями. Например, если переориентирующееся искажение отождествить со сдвигом одного из ближайших к V_{Ga} атома As из своего узла вдоль оси, соединяющей его с V_{Ga} , то смещения атомов As вдоль направлений $\langle 111 \rangle$, лежащих в плоскости фиксированных искажений, будут испытывать различное влияние донора Sn_{Ga} . Поэтому конфигурации, соответствующие этим двум направлениям смещения, не эквивалентны и имеют различные энергии в отсутствие внешнего давления. В рассматриваемой нами модели это можно учесть, исключив из рассмотрения одну из конфигураций (предположив, что ее энергия намного превышает энергию другой конфигурации). В таком случае при $P \parallel [111]$ дополнительное выстраивание наступит только в половине центров, плоскость фиксированного искажения которых содержит ось давления. В результате скачок интегрального поляризационного отношения будет меньше (рис. 4, *b*, кривые 5, 6), чем при моделировании искажений без учета их направлений, и ближе к результатам эксперимента. Оставшееся расхождение расчетных и экспериментальных значений поляризационного отношения в случае $P \parallel [111]$ и различие этих величин при $P \parallel [110]$, как и в [1, 4], могут быть связаны с упрощенностью модели.

Остановимся на результатах расчетов для второго механизма дополнительного выстраивания. Как уже говорилось, в рассматриваемой выше модели он предполагает переориентацию при некотором критическом давлении исходно фиксированной компоненты искажения, направленной вдоль оси типа $\langle 001 \rangle$. Расчеты показывают, что изменение интегрального поляризационного отношения

при дополнительном выстраивании будет примерно таким же, как и в первом механизме. Однако выстраивание становится возможным и при $P \parallel [001]$, что противоречит экспериментам (рис. 4). Чтобы исключить такую возможность, по крайней мере в исследуемом диапазоне давлений, необходимо предположить, что исходные константы деформационного потенциала для возбужденного состояния примесного центра b и d сильно различаются ($3b \ll d$). Но такое предположение противоречит экспериментально наблюдаемым наклонам зависимостей $r_m(P)$ в области «насыщения» [медленного изменения $r_m(P)$] при $T = 2$ К (рис. 4), которые, согласно расчетам, при заданных параметрах расщепления возбужденного состояния δ_{lmn} определяются только значением b в случае $P \parallel [001]$ и только значением d в случае $P \parallel [111]$.

Эти соображения позволяют заключить, что в рассматриваемой модели комплекса переориентация фиксированной при $P = 0$ компоненты в области давлений ~ 5 кбар маловероятна. Можно назвать несколько возможных причин отсутствия этой переориентации. Во-первых, можно предположить, что соответствующая компонента искажения T_σ -симметрии отсутствует, т. е. $\delta_{001} = 0$. Это не изменит симметрии комплекса и качественно не скажется на его пьезоспектроскопических характеристиках и поляризационных диаграммах, поскольку симметрия комплекса остается триклинной и для каждого комплекса в зависимости от направления переориентирующейся компоненты искажения будет существовать по-прежнему две эквивалентные конфигурации. Во-вторых, энергии, отвечающие конфигурациям с различной ориентацией компоненты вдоль оси $\langle 001 \rangle$, могут сильно различаться. Тогда для выстраивания этой компоненты искажения потребуются слишком большие давления. В-третьих, барьер между такими конфигурациями может оставаться непреодолимым при любых экспериментально достижимых величинах давления.

4. Обсуждение

Проведенный выше анализ показывает, что причиной необычного поведения поляризации ФЛ комплекса $V_{Ga}Sn_{Ga}$ при низких температурах и одноосных давлениях ~ 5 кбар вдоль направлений типа $\langle 111 \rangle$ или $\langle 110 \rangle$ является дополнительное выстраивание части комплексов. Такое выстраивание может происходить лишь в том случае, если изменение энергии электронного состояния комплекса внешним давлением сравнимо с разницей в энергиях его различных конфигураций. Если состояние комплекса рассматривать как состояние V_{Ga} , возмущенное донором Sn_{Ga} [1, 5], а переориентирующуюся компоненту искажения симметрии решетки в области комплекса связывать с искажением V_{Ga} (смещением окружающих ее атомов As), то дополнительное выстраивание означает подавление внешней деформацией воздействия Sn_{Ga} на состояние V_{Ga} .

Модель комплекса $V_{Ga}Sn_{Ga}$, предложенная ранее [1] для объяснения поляризационных диаграмм ФЛ и поведения поляризации ФЛ при небольших одноосных давлениях, способна объяснить и явление дополнительного выстраивания. Рассмотрение механизмов этого эффекта в указанной модели позволяет заключить, что он может быть свойственен комплексам, низкая симметрия которых обусловлена как присутствием в их составе нескольких элементарных дефектов, так и смещением атомов комплекса из узлов решетки (или из высокосимметричных положений в междоузлиях). По-видимому, в подобных центрах возможно существование и нескольких ступеней дополнительного выстраивания.

Однако для комплекса $V_{Ga}Te_{As}$ при $P \leq 10$ кбар такое дополнительное выстраивание отсутствует [4]. В модели, предполагающей переориентацию комплекса в возбужденном состоянии [4], для первого механизма дополнительного выстраивания это можно связать с тем, что разница в возмущении донором вакансионных состояний различных конфигураций комплекса в случае $V_{Ga}Te_{As}$

может оказаться выше, чем в случае $V_{Ga}Sn_{Ga}$. В той же модели для второго механизма, поскольку конфигурации комплекса $V_{Ga}Te_{As}$ с различными направлениями компоненты искажения вдоль оси типа $\langle 001 \rangle$ эквивалентны, единственной причиной отсутствия дополнительного выстраивания может быть большая величина потенциальных барьеров между конфигурациями с различной ориентацией фиксированных при $P=0$ компонент искажения.³

Отсутствие дополнительного выстраивания в комплексах $V_{Ga}Te_{As}$ можно объяснить также, несколько изменив предложенную в [4] модель этого комплекса. Предположим, что компонента фиксированного искажения вдоль оси типа $\langle 001 \rangle$ отсутствует ($\delta_{001} = 0$). Тогда в силу того, что донор в комплексе занимает один из ближайших к V_{Ga} узлов подрешетки As, комплекс имеет не 2, а 3 эквивалентных конфигурации. Каждая из этих конфигураций соответствует направлению переориентирующейся компоненты вдоль одной из осей типа $\langle 111 \rangle$, соединяющей V_{Ga} с одним из трех оставшихся вблизи нее атомов As. Примером такого искажения может быть смещение одного из этих атомов из узла вдоль оси $As-V_{Ga}$. В силу этого при $P \parallel [111]$ на первой ступени выстраивания (при $P \approx 0$) будут выстраиваться все комплексы, в которых ось давления не совпадает с исходной осью $V_{Ga}Te_{As}$. Выстраивание же оставшейся группы комплексов (которое сводится к совпадению в них направлений переориентирующейся и фиксированной компонент искажения) в силу нахождения Te_{As} в первой конфигурационной сфере от V_{Ga} если и возможно, то только при очень больших давлениях. При $P \parallel [110]$ в этой модели при любой ориентации комплекса относительно направления оси P выстраивание происходит на первой ступени при $P \approx 0$.

Компонента фиксированного искажения вдоль оси типа $\langle 001 \rangle$ наряду с двумя другими компонентами (фиксированной и переориентирующейся), направленными вдоль осей типа $\langle 111 \rangle$, была введена в [4] для объяснения поляризационных диаграмм ФЛ комплекса $V_{Ga}Te_{As}$. Однако и в случае $\delta_{001} = 0$ можно предложить модель, качественно объясняющую поляризационные диаграммы и поведение поляризации ФЛ при одноосном давлении, полученные в [2, 4] для $V_{Ga}Te_{As}$. В этой модели искажение T_d -симметрии центра представляет собой суперпозицию двух компонент, направленных вдоль различных осей типа $\langle 111 \rangle$. Одна из этих компонент (которую можно связать с исходной анизотропией пары $V_{Ga}Te_{As}$) фиксирована. Другая компонента (которую можно связать с искажением V_{Ga} из-за эффекта Яна-Теллера) в возбужденном состоянии центра также фиксирована, а в основном — способна переориентироваться при низких температурах. В таком случае низкотемпературное поведение поляризации ФЛ при одноосном давлении будет определяться выстраиванием комплексов в основном состоянии, а поляризационные диаграммы при $P=0$ будут определяться ФЛ от непереориентирующихся в возбужденном состоянии комплексов. Симметрия комплекса $V_{Ga}Te_{As}$ в такой модели будет моноклинной. Существенной чертой модели, отличающей ее от рассмотренной в [4], кроме условия $\delta_{001} = 0$, является отсутствие переориентации комплекса в возбужденном состоянии, которое и обеспечивает качественное согласие расчетных поляризационных диаграмм с экспериментом [2, 3]. Для окончательного выбора и уточнения модели комплексов $V_{Ga}Te_{As}$ и $V_{Ga}Sn_{Ga}$ требуются дополнительные исследования и, возможно, детальный анализ данных на основе моделей, более точно описывающих реальное электронное и пространственное строение комплексов.

³ Оценки, использующие факт отсутствия переориентации компоненты вдоль оси $\langle 001 \rangle$ при $T = 77$ К в случае $V_{Ga}Te_{As}$ (этот вывод следует из совпадения поляризационных диаграмм при температурах 2 и 77 К), дают нижний предел для величины этого потенциального барьера порядка 100 мэВ

В заключение авторы хотели бы выразить признательность Фонду фундаментальных исследований отделения твердотельной электроники ФТИ им. А. Ф. Иоффе РАН за частичную поддержку данной работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] А. А. Гуткин, М. А. Решиков, В. Р. Сосновский. ФТП, 27, 1516 (1993).
- [2] Н. С. Аверкиев, А. А. Гуткин, Е. Б. Осипов, М. А. Решиков, В. Р. Сосновский. ФТП, 26, 1269 (1992).
- [3] Н. С. Аверкиев, А. А. Гуткин, Е. Б. Осипов, М. А. Решиков, В. Е. Седов, В. Р. Сосновский. ФТП, 25, 50 (1991).
- [4] Н. С. Аверкиев, А. А. Гуткин, Е. Б. Осипов, М. А. Решиков, В. Е. Седов, В. Р. Сосновский. ФТП, 25, 58 (1991).
- [5] С. W. Myles, O. F. Sankey. Phys. Rev. B, 29, 6810 (1984).

Редактор Л. В. Шаронова
