

ТОНКАЯ СТРУКТУРА СПЕКТРОВ РЕКОМБИНАЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭКСИТОНОВ, СВЯЗАННЫХ НА АКЦЕПТОРАХ В КРЕМНИИ

А.С.Каминский, А.Н.Сафонов

*Институт радиотехники и электроники РАН
101000, Москва*

Поступила в редакцию 26 декабря 1991 г.

После переработки 15 января 1992 г.

Показано, что для связанных экситонов тонкое расщепление спектральных компонент, обусловленных долин-орбитальным взаимодействием, объясняется понижением симметрии акцепторного центра вследствие эффекта Яна-Теллера.

В ¹ мы исследовали спектры рекомбинационного излучения экситонов, связанных на акцепторах (элементы III группы) в монокристаллическом кремнии. Обнаруженная структура в спектрах рекомбинационного излучения была объяснена долин-орбитальным расщеплением основного состояния связанных экситонов. В ² показано, что каждая из наблюдавшихся нами линий расщеплена на две. Однако, авторы ² не смогли объяснить это дополнительное расщепление. В настоящей статье приводятся дополнительные экспериментальные данные и предлагается объяснение природы этого расщепления.

Мы ограничились исследованием образцов монокристаллического кремния, легированного алюминием и галлием. Образцы помещались в λ -гелий и возбуждались излучением аргонового лазера ЛГН-40-А. Излучение возникающих при этом связанных на акцепторах экситонов анализировалось спектрометром, включающим в себя интерферометр Фабри-Перо, и регистрировалось охлаждаемым ФЭУ ³. На заключительном этапе полученный спектр подвергался операции деконволюции, что позволяло частично устранить искажения, вносимые спектрометром¹). В итоге спектральное разрешение составляло 5 мкэВ. Методика одноосного сжатия образцов, позволяющая получить однородную деформацию, описана в ³.

На рис.1 приведены характерные спектры рекомбинационного излучения экситонов, связанных на примесных атомах алюминия в кремнии. Спектр на рис.1а представляет экспериментальное спектральное распределение рекомбинационного излучения связанных экситонов. Спектральное распределение этого излучения, полученное после математической обработки, представлено на рис.1б. Оно хорошо согласуется с полученным в ². Спектр, полученный в условиях одноосного сжатия образца в направлении [111], представлен на рис.1в. Аналогичные спектры рекомбинационного излучения экситонов, связанных на примесных атомах галлия, приведены на рис.2.

Характерным для спектров рекомбинационного излучения, полученных в отсутствие одноосного сжатия образцов (рис.1б и 2б), является расщепление, по крайней мере, на две компоненты каждой из линий, связанных нами ¹ с долин-орбитальным расщеплением основного состояния связанного экситона. Отметим, что в случае галлия (рис.2б) это расщепление выражено менее четко. При сжатии образцов в направлении [111] спектральное распределение

¹)Нами использовалась программа, ⁴ которая позволяет получать предельное сверхразрешение при заданном отношении сигнал/шум. Эта программа увеличивает в несколько раз спектральное разрешение и что особенно важно, в отличие от других подобных программ, не дает ложных линий.

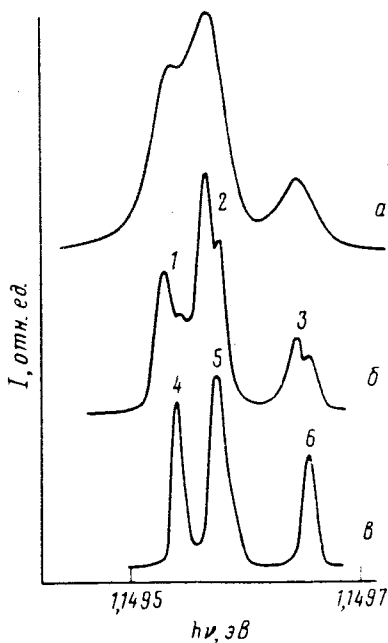


Рис.1

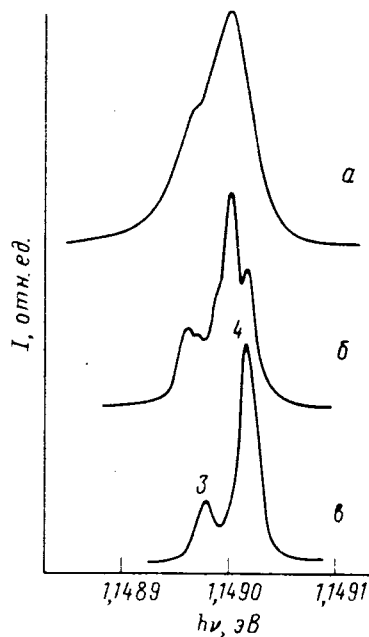


Рис.2

Рис. 1. Спектральное распределение α -NP-компонент излучения экситонов, связанных на примесных атомах алюминия в кремнии ($N_{Al} = 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), при 2К. а: $P = 0$, экспериментальный спектр; б: $P = 0$, спектр, полученный после устранения искажений вносимых спектрометром; в: $P \parallel [111]$, $p = 17 \text{ МПа}$, после устранения искажений вносимых спектрометром. Цифры обозначают компоненты спектра в соответствии с обозначениями введенными в ¹

Рис. 2. Спектральное распределение α -NP-компонент излучения экситонов, связанных на примесных атомах галлия в кремнии ($N_{Al} = 7 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$), при 2К. а: $P = 0$, экспериментальный спектр; б: $P = 0$, спектр, полученный после устранения искажений вносимых спектрометром; в: $P \parallel [111]$, $p = 8 \text{ МПа}$, после устранения искажений вносимых спектрометром. Цифры обозначают компоненты спектра в соответствии с обозначениями введенными в ¹

рекомбинационного излучения резко изменяется: конечное после оптического перехода акцепторное состояние Γ_8 расщепляется на два Γ_4 и $\Gamma_6 + \Gamma_7$ и в спектрах появляются две идентичные группы линий, каждая из которых соответствует оптическим переходам в эти состояния ¹. Напомним, что деформация кремния вдоль направления $[111]$ не снимает вырождения электронов по долинам и не должна заметно влиять на долин-орбитальное взаимодействие электрона с центральной ячейкой. Поэтому естественно, что спектры соответствующие этим переходам, если не учитывать более тонкой структуры, совпадают со спектрами, полученными при $P = 0$ (P - давление). На рис.1в и 2в приведены только фрагменты из спектра рекомбинационного излучения, соответствующие переходам в состоянии $\Gamma_6 + \Gamma_7$. Важно то, что при сжатии образцов в направлении $[111]$ исчезает тонкая структура и линии излучения становятся приблизительно в два раза уже. Из сказанного следует также, что тонкое расщепление линий рекомбинационного излучения нельзя объяснить долин-орбитальным взаимодействием.

По нашему мнению, тонкое расщепление линий рекомбинационного излучения экситонов, связанных на акцепторах ($P = 0$), обусловлено понижением симметрии акцептора вследствие статического или динамического эффекта Яна-Теллера.

В случае статического эффекта Яна-Теллера акцептор, вследствие вза-

взаимодействия с одной из локальных колебательных мод, смешается из узла кристаллической решетки в одну из потенциальных ям, которой соответствует минимум потенциальной энергии акцепторного центра и связанного на нем экситона. При этом в рамках адиабатического приближения конечное четырехкратно вырожденное состояние акцептора Γ_8 должно расщепиться на два двукратно вырожденных и, в соответствии с принципом Франка-Кондона, это должно привести к расщеплению линий в спектрах рекомбинационного излучения. При одноосном сжатии кристалла вырождение основного состояния акцептора снимается. По этой причине в спектрах рекомбинационного излучения одноосно сжатых кристаллов отсутствует тонкая структура.

В случае динамического эффекта Яна-Теллера возможно резонансное туннелирование примесного атома между эквивалентными потенциальными ямами, при этом будет сниматься вырождение уровней акцепторного центра, что приведет к расщеплению линий рекомбинационного излучения. Одноосное сжатие кристалла должно подавлять процесс туннелирования и, следовательно, связанное с ним расщепление уровней.

В силу того, что неизвестен характер взаимодействия дырок, связанных на акцепторе, с различными колебательными модами, трудно сказать статический или динамический эффект Яна-Теллера реализуется в нашем случае.

Следует отметить, что при понижении симметрии акцепторного центра, обусловленном смещением атома из узла кристаллической решетки, должно происходить расщепление электронных термов Γ_3 , Γ_5 и линии 1, 2 (рис.1б), соответствующие этим термам, должны иметь более сложную структуру, чем линия 3 (рис.1б), соответствующая электронному терму Γ_1 . Мы же наблюдаем примерно одинаковое расщепление для всех трех линий. Отсутствие дополнительного расщепления линий 1, 2, вероятнее всего, связано с тем, что взаимодействие сильно делокализованного электрона, волновая функция которого на центре обращается в нуль, с локальными колебаниями атомного центра значительно слабее фонон-дырочного взаимодействия, вызывающего эффект Яна-Теллера.

Для донорных центров аналогичного расщепления линий в спектрах рекомбинационного излучения не наблюдается. Это естественно, так как основное электронное состояние донора не вырождено и эффект Яна-Теллера не может привести к расщеплению спектральных линий рекомбинационного излучения.

Авторы благодарны Е.Л.Косареву и Е.Р.Подольку (ИФП РАН) за предоставление программы обработки спектров и за консультации по ее использованию, позволившие выполнить эту работу, а также Н.С.Аверкиеву и А.А.Гуткину (ЛФТИ РАН) за плодотворное обсуждение результатов.

-
1. М.В.Горбунов, А.С.Каминский, А.Н.Сафонов, ЖЭТФ 94, 247 (1988).
 2. M.L.W.Thewalt and D.M.Brake, Materials. Science Forum 65-66, 187 (1990).
 3. А.С.Каминский, В.А.Карасюк, Я.Е.Покровский, ЖЭТФ 83, 2237 (1982).
 4. В.И. Гельфгат, Е.Л.Косарев, Е.Р.Подольск, ПТЭ 5, 86 (1991).