

УДК 621.315.592.3

**СЕРО- И СЕЛЕНОСОДЕРЖАЩИЕ ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЦЕНТРЫ НА ОСНОВЕ ИОНОВ  $Yb^{3+}$  В КРИСТАЛЛАХ GaAs**

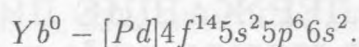
В. М. Коннов, Н. Н. Лойко, Т. В. Ларикова

*Проведение комбинированных имплантаций  $Yb, S, Se$  и  $O$  в кристаллы  $GaAs$  и исследование спектров фотолюминесценции (ФЛ) полученных образцов позволило выявить роль  $S$  и  $Se$  в образовании редкоземельных (РЗ) центров, а также номенклатуру основных доминирующих линий в РЗ спектрах, связанных с примесями  $S$  и  $Se$ . На основании полученных результатов предложены модели серо- и селеносодержащих люминесцентных центров на основе иона  $Yb^{3+}$ .*

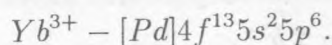
Об основных результатах комбинированных имплантаций  $Yb+O$ ,  $Yb+S+O$  и  $Yb+Se+O$  в кристаллы  $GaAs$  уже сообщалось [1, 2]. Если в образцы  $GaAs$ , имплантированные  $Yb$  и  $O$  до расчетных концентраций  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , дополнительно ввести ионы  $S$  также до концентрации  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , то после фотостимулированного отжига (ФСО) образцов при температуре  $620 - 680^\circ C$  в спектрах РЗ излучения, как правило, доминирует линия  $10115 \text{ \AA}$ . Если при подготовке образцов использовать имплантацию  $Se$  вместо  $S$ , то в спектрах, как правило, будет доминировать линия  $10060 \text{ \AA}$ . В работе [2] для объяснения полученных результатов были сделаны предположения о влиянии окружения РЗ иона на величину энергии перехода  $^2F_{5/2} \rightarrow ^2F_{7/2}$  иона  $Yb^{3+}$ .

При использовании имплантации  $Yb+S+O$  появление в спектрах ФЛ линии  $10115 \text{ \AA}$  мы связали с возникновением РЗ центра  $S1$ . По нашим представлениям, этот центр имеет следующую атомную структуру: ион  $Yb^{3+}$  замещает ион  $Ga$  в решетке  $GaAs$ ; в первой координационной сфере иона  $Yb^{3+}$  находятся три иона  $As$  и один ион  $S$ ; вторую координационную сферу составляют 12 ионов  $Ga$ ; из 36 ионов  $As$ , составляющих третью координационную сферу, по крайней мере один (или несколько) замещен на ион  $O$ . На

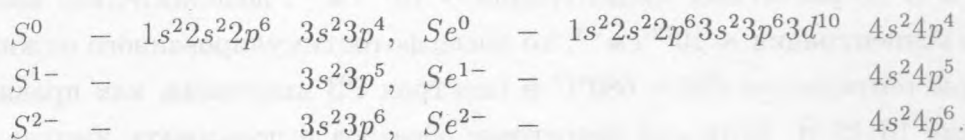
наш взгляд, существенным моментом при образовании РЗ центра является перераспределение электронной плотности внутри первой координационной сферы. Электронная конфигурация иона  $Yb^0$  выглядит следующим образом:



Радиус такого иона достаточно велик и составляет  $\simeq 1,5 - 1,8 \text{ \AA}$  [3]. После проведения имплантаций необходим отжиг, как для восстановления кристаллической матрицы, так и для образования РЗ центров  $Yb^{3+}$ . При проведении ФСО идет диффузия примесей из нарушенного имплантацией слоя в область расположения введенного  $Yb$ . По нашим наблюдениям у атомов  $S$  более низкий температурный порог для диффузии в кристаллах  $GaAs$ , чем у  $Se$  или  $Te$ . Для относительно чистых кристаллов  $GaAs$  (при концентрации фоновых примесей  $\leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) он лежит в интервале температур  $580 - 600^\circ C$ . В процессе диффузии ион  $S^0$  входит в первую координационную сферу  $Yb$ , и в результате их взаимодействия происходит образование ионов  $Yb^{3+}$  и отрицательно заряженных ионов  $S$ . Электронная конфигурация иона  $Yb^{3+}$  выглядит следующим образом:

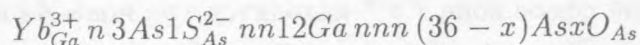


При этом два электрона орбитали  $6s$  иона  $Yb^0$  переходят к иону  $S^0$ , образуя ионы  $Yb^{3+}$  и  $S^{2-}$ . Возможные электронные конфигурации ионов  $S$  и  $Se$  выглядят следующим образом:



Смена зарядового состояния РЗ иона приводит к достаточно резкому уменьшению его размеров. Его радиус уменьшается до  $0,8 - 0,9 \text{ \AA}$ , что делает возможным расположение иона  $Yb^{3+}$  в узле  $Ga$  [3].

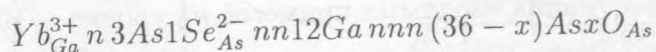
Таким образом, атомная структура центра, обозначенного  $S1$ , выглядит следующим образом:



или в упрощенном виде  $- Yb^{3+} = S^{2-}$ .

Мы предполагаем, что в результате комбинированных имплантаций типа  $-Yb + S + O$  в кристаллы  $GaAs$  образуются РЗ центры, обладающие сложной атомной структурой, которая включает в себя, как минимум, три координационные сферы. Ион  $Yb^{3+}$  со своей первой координационной сферой мы назвали ядром центра. Спектральное положение линий люминесценции центра определяется как первой, так и второй координационной сферой, при доминирующей роли первой. Ионы, входящие в третью координационную сферу, осуществляют связь РЗ иона с кристаллической матрицей и обеспечивают центр энергией, необходимой для возбуждения  $4f$ -оболочки РЗ иона. Ядро центра, по нашим наблюдениям, с точностью  $\simeq 1 - 3 \text{ meV}$  определяет положение соответствующей линии в спектре ФЛ.

Центр  $Se1$  по своей атомной структуре выглядит аналогично центру  $S1$ :



$$\text{или } Yb^{3+} = Se^{2-}.$$

С этим центром мы связываем линию  $10058 - 10060 \text{ \AA}$ . Этот центр принадлежит к числу наиболее часто встречающихся центров на основе иона  $Yb^{3+}$  в кристаллах  $GaAs$ , образующихся при имплантации  $Yb + O$ .

Как показали дальнейшие исследования центров на основе ионов  $Yb^{3+}$  в матрице  $GaAs$ , номенклатура серо- и селеносодержащих центров не ограничивается только центрами вида  $S1$  и  $Se1$ .

Для комбинированных имплантаций чаще всего использовались специально легированные кристаллы полуизолирующего  $GaAs$ . Основными фоновыми примесями в этих кристаллах являлись  $C, Si$  и  $Se$  с концентрациями  $\leq 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Имплантации  $Yb + O$  проводились по всей поверхности образца. Дополнительной имплантации  $S$  или  $Se$  подвергалась половина каждого образца. Вторая половина образца, имплантированная  $Yb + O$ , служила для контроля за ходом ФСО и для сравнения спектров РЗ излучения, снятых на обеих частях образца. Имплантация  $Yb, O, S$  и  $Se$  проводилась распределенными дозами так, чтобы в слое толщиной  $1500 - 1700 \text{ \AA}$  расчетные концентрации вводимых примесей были равны друг другу. После имплантации образцы проходили процедуру отжига (ФСО). ФСО проводился на образцах без защитного покрытия в атмосфере водорода. Измерения спектров ФЛ проводились при  $77 \text{ K}$  методом синхронного детектирования.

Проведение дополнительной имплантации  $S$  или  $Se$  после имплантаций  $Yb + O$ , особенно при концентрациях вводимых примесей на уровне  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , вызывает радикальную перестройку РЗ спектра в области от 10000 до 10150 Å. Рис. 1 иллюстрирует характер основных тенденций этих изменений.

На рис. 1.1 показан спектр РЗ излучения одной половины образца  $GaAs$  после имплантации  $Yb + O$  до концентраций  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и однократного ФСО при  $700^\circ\text{C}$  длительностью 5 минут. В спектре доминируют линии 10060 Å ( $Se1$ ) и 10080 Å.

Дополнительная имплантация  $Se$  до концентрации  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  на аналогичных образцах после ФСО при  $700^\circ\text{C}$  не привела к качественному изменению спектра РЗ излучения. В спектре по-прежнему доминировали линии 10060 Å и 10080 Å, но интенсивности этих линий возросли примерно на порядок. Работая с различными по составу фоновых примесей образцами  $GaAs$ , имплантированными  $Yb + O$  или  $Yb + Se + O$ , особенно в области концентраций вводимых примесей на уровне  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , мы обратили внимание, что помимо линии 10060 Å систематически наблюдается линия 10080 Å, которая также связана с присутствием в образце именно  $Se$ . Можно предположить, что эта линия связана с образованием в ионно-легированном слое нового центра на основе иона  $Yb^{3+}$  и ионов  $Se$ , который мы обозначили, как  $Se2$ . В этом случае ядро этого центра выглядит следующим образом:



У этого центра два однократно отрицательно заряженных иона  $Se^{1-}$  замещают ионы  $As$  в первой координационной сфере иона  $Yb^{3+}$ ; при этом каждый из двух электронов орбитали  $6s$  иона  $Yb^0$  переходит к разным ионам  $Se^0$ .

На рис. 1.2 показан спектр второй половины того же самого образца  $GaAs$  после дополнительной имплантации  $S$  до концентрации  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . После однократного ФСО при  $700^\circ\text{C}$  в спектре доминирует линия 10115 Å, которую мы связываем с центром  $S1$ .

На рис. 1.3 показан спектр образца с высокой концентрацией фонового  $Se$  (более, чем  $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) после имплантации  $Yb + S + O$  до концентраций  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  и ФСО при  $700^\circ\text{C}$ . Отжиг этого образца после имплантации проводился ступенчато, начиная с температуры ФСО в  $580^\circ\text{C}$  с шагом  $20^\circ\text{C}$  и длительностью каждого шага 5 минут. После каждого этапа ФСО проводились измерения спектра ФЛ. На ранних этапах ФСО наличие в образце фонового  $Se$  не сказывалось на спектрах ФЛ. Но после ФСО при  $640^\circ$  роль  $Se$  в формировании центров излучения иона  $Yb^{3+}$  стала возрастать. Так, на рис. 1.3 показан спектр РЗ излучения такого образца после отжига при  $700^\circ\text{C}$ ; до этого



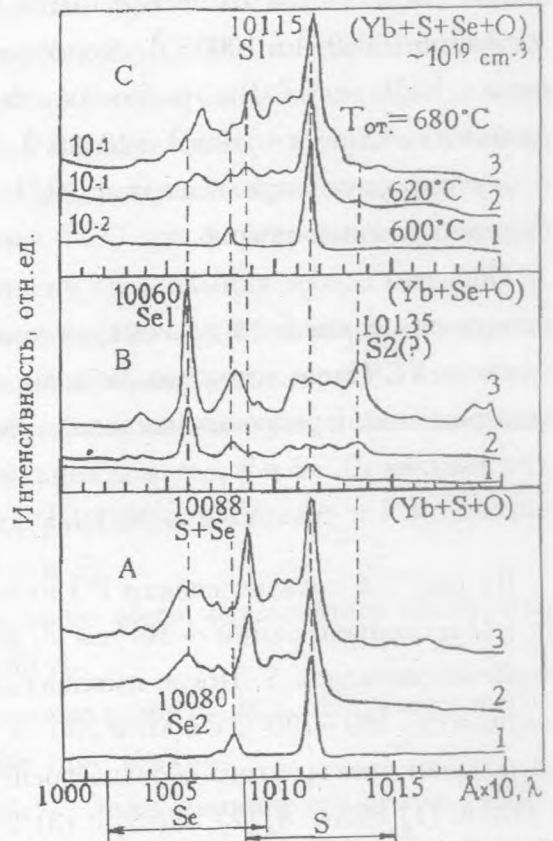
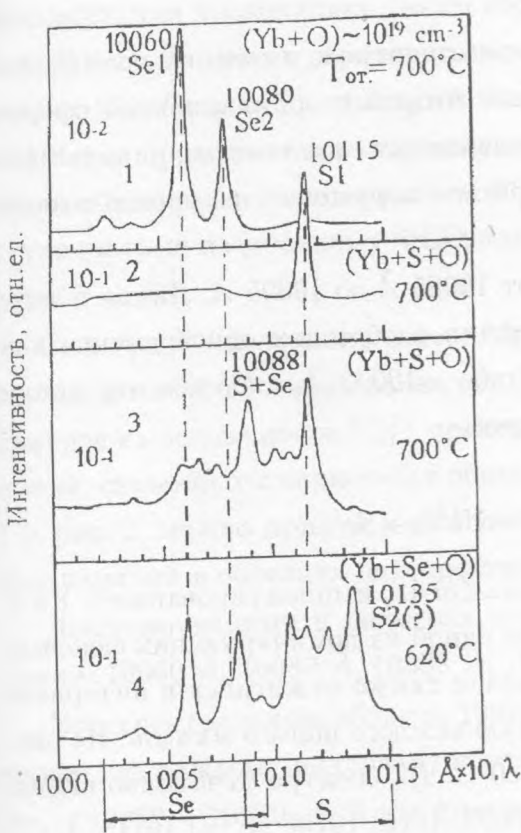


Рис. 1. Спектры ФЛ образцов GaAs, имплантированных до расчетных концентраций  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , в диапазоне 10000 – 10150 Å: 1 – половина образца, имплантированная Yb + O после однократного ФСО при 700°C длительностью 5 минут. Основная фоновая примесь в этом образце Se; 2 – вторая половина того же образца, имплантированная Yb + S + O после однократного ФСО при 700°C длительностью 5 минут; 3 – образец, имплантированный Yb + S + O после ступенчатого ФСО. Показан спектр после ФСО при 700°C. Основная фоновая примесь в исходном образце – Se; 4 – образец, имплантированный Yb + Se + O после ступенчатого ФСО. Показан спектр после ФСО при 620°C. Основная фоновая примесь в исходном образце – S.

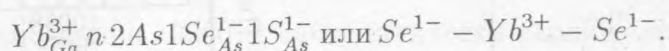
Рис. 2. Спектры ФЛ образца GaAs, имплантированного до расчетных концентраций  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  после ФСО при 1 – 600°C; 2 – 620°C; 3 – 680°C: А – часть образца, имплантированная Yb + S + O; В – часть образца, имплантированная Yb + Se + O; С – часть образца, имплантированная Yb + S + Se + O.

образец отжигался 6 раз – при 580, 600, 620, 640, 660 и 680°C. В спектре доминируют

две линии – 10088 Å и 10115 Å. Заметны также линии 10060 Å, 10065 Å и 10073 Å. От линии 10080 Å осталась только слабо выраженная ступенька. Достаточно отчетливо видны также линии 10100 Å и 10108 Å.

Линии 10060 Å и 10065 Å, скорее всего, принадлежат центрам, имеющим одинаковое ядро –  $Yb^{3+} = Se^{2-}$ , но разное окружение на уровне второй координационной сферы. Аналогично линии 10100 Å и 10108 Å, скорее всего, являются сателлитами линии 10115 Å – у них одно ядро центра –  $Yb^{3+} = S^{2-}$ , но разное окружение на уровне второй координационной сферы.

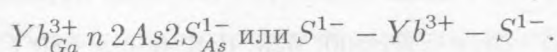
Обратим особое внимание на участок спектра от 10085 Å до 10095 Å. Линии в этом интервале появляются в спектрах только при наличии в образцах одновременно как  $S$ , так и  $Se$ . Чаще всего это либо линия 10088 Å, либо – 10092 Å, либо обе эти линии одновременно. Предположительно, это центры с ядром



На рис. 1.4 показан спектр РЗ излучения образца  $GaAs$ , имплантированного  $Yb + Se + O$  до концентраций  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В этом образце одной из доминирующих фоновых примесей являлась  $S$ . После имплантации этот образец также отжигался в интервале температур 580–700°C с шагом 20°C и длительностью каждого шага 5 минут. На рис. 1.4 показан спектр этого образца после ФСО при 620°C. На спектре отчетливо видны 8 линий: (1) 10060 Å; (2) 10078 Å; (3) 10086 Å; (4) 10092 Å; (5) 10106 Å; (6) 10115 Å; (7) 10124 Å; (8) 10135 Å. При этом линии 10060 Å, 10086 Å, 10106 Å и 10135 Å являются доминирующими.

С ростом температуры ФСО распределение интенсивностей между линиями этого спектрального интервала менялось. Линия 10060 Å после ФСО при 660°C и выше стала доминировать в спектре этого образца. Интенсивность линии 10078 Å – 10080 Å также возросла, а интенсивность линии 10086 Å – 10088 Å – уменьшилась. Интенсивность линий интервала 10100 Å – 10150 Å с ростом температуры ФСО также уменьшалась. Спектр этого образца после ФСО при 700°C стал качественно похож на спектр, изображенный на рис. 1.1.

Обратим внимание на линию 10135 Å. Возможно, что эта линия связана с центром, у которого в первой координационной сфере находятся два иона  $S^{1-}$ . Ядро этого центра выглядит следующим образом:



Для подтверждения предположений, высказанных ранее, были проведены имплантации  $Yb+S+Se+O$  в кристаллы  $GaAs$ , разнообразные по исходному примесному составу. Имплантации проводились таким образом, что каждый образец состоял из трех частей –  $A, B$  и  $C$ .  $A$  – часть образца, имплантированная  $Yb+S+O$ ;  $B$  – часть, имплантированная  $Yb+Se+O$ ;  $C$  – часть, имплантированная  $Yb+S+Se+O$ . Имплантации каждой примесью проводились распределенными дозами. Расчетные концентрации каждой из вводимых примесей составляли  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . После имплантаций образцы подвергались ступенчатому изохронному ФСО или однократному ФСО при фиксированной температуре.

Спектры РЗ излучения такого образца в диапазоне  $10000 - 10200 \text{ \AA}$  на разных этапах ступенчатого ФСО показаны на рис. 2. Видно, что разнообразные спектры РЗ излучения центров на основе ионов  $Yb^{3+}$  представляют собой наборы из ранее уже наблюдавшихся линий, связанных с наличием в образцах примесей, прежде всего,  $S$  и  $Se$ . Сравнивая рис. 1 и рис. 2, можно прийти к заключению, что линия  $10088 \text{ \AA}$  возникает в РЗ спектрах при наличии в образцах одновременно примесей  $S$  и  $Se$ .

Доминирующими в спектрах этих образцов, чаще всего, оказывались следующие линии:  $10060 \text{ \AA}$ ,  $10080 \text{ \AA}$ ,  $10088 \text{ \AA}$ ,  $10115 \text{ \AA}$  и  $10135 \text{ \AA}$ .

Всю спектральную область  $10020 - 10150 \text{ \AA}$  можно разбить на 5 следующих интервалов, где каждому интервалу соответствует свое ядро центра:

1.  $10020 - 10070 \text{ \AA}$ . Ядро центра –  $Yb^{3+} = Se^{2-}$ . Здесь доминирует линия  $10057 - 10060 \text{ \AA}$ . Заметны также линии  $10048 - 10050 \text{ \AA}$ ,  $10054 \text{ \AA}$ ,  $10064 \text{ \AA}$  и  $10067 \text{ \AA}$ .
2.  $10070 - 10085 \text{ \AA}$ . Ядро центра –  $Se^{1-} - Yb^{3+} - Se^{1-}$ . Доминирует линия  $10080 \text{ \AA}$ , достаточно часто появляются линии  $10073 \text{ \AA}$  и  $10084 \text{ \AA}$ .
3.  $10085 - 10095 \text{ \AA}$ . Ядро центра –  $Se^{1-} - Yb^{3+} - Se^{1-}$ . Доминирует линия  $10088 \text{ \AA}$ , часто заметна и линия  $10092 \text{ \AA}$ .
4.  $10095 - 10120 \text{ \AA}$ . Ядро центра –  $Yb^{3+} = S^{2-}$ . Доминирует линия  $10115 - 10118 \text{ \AA}$ , часто заметны линии  $10098 - 10101 \text{ \AA}$  и  $10105 - 10108 \text{ \AA}$ .
5.  $10120 - 10150 \text{ \AA}$ . Предположительно, ядро центра –  $S^{1-} - Yb^{3+} - S^{1-}$ . Доминирует линия  $10135 \text{ \AA}$ , заметны линии  $10124 - 10126 \text{ \AA}$  и  $10144 - 10146 \text{ \AA}$ .

Как видно из рис. 1 и 2, спектральная область, где  $S$  является основным химическим элементом, участвующим в создании РЗ центров, лежит от  $10085 \text{ \AA}$  до  $10150 \text{ \AA}$ . "Область ответственности"  $Se$  за РЗ излучение лежит в интервале от  $10020 \text{ \AA}$  до  $10095 \text{ \AA}$ . Между этими двумя областями лежит пограничная область  $10085 - 10095 \text{ \AA}$ , где РЗ излучение связано как с  $S$ , так и с  $Se$ .

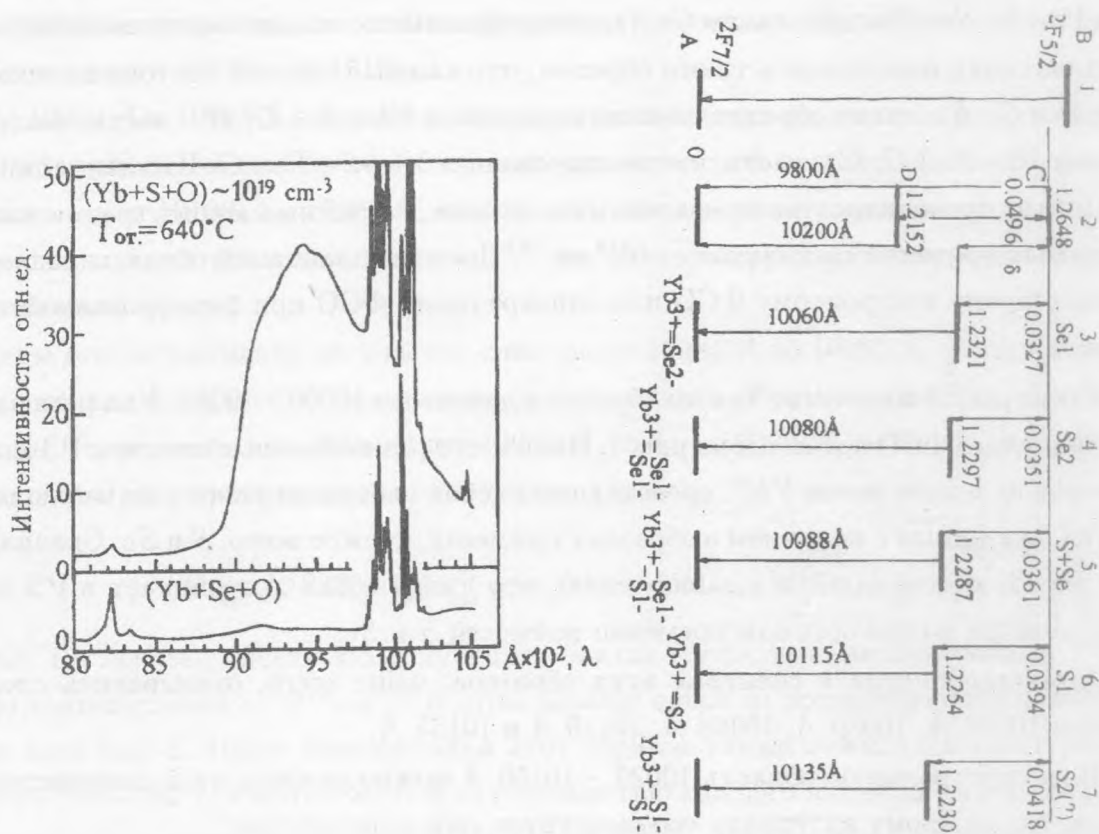


Рис. 3. Обзорные спектры ФЛ образца GaAs, имплантированного до расчетных концентраций  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  после ФСО при  $640^\circ\text{C}$  длительностью 5 минут. Одна половина образца имплантирована  $Yb + S + O$ , а другая -  $Yb + Se + O$ .

Рис. 4. Энергетическая схема переходов иона  $Yb^{3+}$ . 1 - переход  $2F_{5/2} \rightarrow 2F_{7/2}$  иона  $Yb^{3+}$  в приближении свободного иона (в вакууме); 2 - границы излучения иона  $Yb^{3+}$  в решетке GaAs; 3 - 7 - переход  $2F_{5/2} \rightarrow 2F_{7/2}$  иона  $Yb^{3+}$  для соответствующих серо- и селеносодержащих центров.

Следует отметить, что работа с образцами с высокими концентрациями фоновых или имплантированных примесей выявила ряд характерных особенностей этих образцов. Так, в образцах с повышенным содержанием S (а именно к таким принадлежит образец, спектры которого приведены на рис. 2) меняется порядок появления линий селеновой



группы. Обычно при температуре ФСО в  $620^\circ\text{C}$  первой появляется линия  $10060 \text{ \AA}$ , а линия  $10080 \text{ \AA}$  – при  $640^\circ\text{C}$ . Как видно из рис. 2 А1 и С1, линия  $10080 \text{ \AA}$  появилась уже после ФСО при  $600^\circ\text{C}$ .

Как правило, при работе с образцами с концентрациями фоновых примесей  $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  результаты ступенчатого изохронного ФСО, проведенного до температуры  $T_0$ , и однократного ФСО, проведенного при той же температуре  $T_0$ , вполне сопоставимы. При работе с образцами с высокими концентрациями ( $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ ) фоновых или имплантированных примесей результаты ступенчатого ФСО и однократного ФСО достаточно часто отличаются друг от друга. На наш взгляд, это связано с тем, что при ступенчатом проведении ФСО возрастает как роль диффузии примесей из нарушенного имплантацией слоя в область расположения РЗ ионов, так и роль межпримесных взаимодействий в самом нарушенном слое.

На рис. 3 показаны обзорные спектры образца, одна половина которого имплантирована  $\text{Yb} + \text{S} + \text{O}$ , а другая –  $\text{Yb} + \text{Se} + \text{O}$ . Расчетные концентрации каждой из вводимых примесей составляли  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Спектры показаны после ФСО образца при  $640^\circ\text{C}$ .

Отметим, что по ряду данных – таких, как соотношения между интенсивностями краевого излучения на  $8220 - 8230 \text{ \AA}$  и интенсивностями полосы примесно-дефектной части спектра на  $9200 - 9800 \text{ \AA}$  – кристаллы  $\text{GaAs}$ , в общем, лучше переносят дополнительную имплантацию  $\text{Se}$ , чем имплантацию  $\text{S}$ . Рост интенсивности краевого излучения с ростом температуры изохронного ФСО идет быстрее для образцов, имплантированных  $\text{Se}$ , чем для образцов, имплантированных  $\text{S}$ . При имплантации  $\text{S}$  рост интенсивности полосы  $9200 - 9800 \text{ \AA}$  при ФСО идет значительно быстрее, чем при имплантации  $\text{Se}$ . Как видно из рис. 3, при имплантации  $\text{Se}$  интенсивность краевого излучения растет быстрее, чем интенсивность примесно-дефектной полосы. При имплантации  $\text{S}$ , как правило, интенсивность примесно-дефектной полосы существенно превышает интенсивность краевого излучения.

По-видимому, такое поведение  $\text{S}$  и  $\text{Se}$  связано, по крайней мере, с двумя особенностями их взаимодействия с другими примесями и дефектами в решетке  $\text{GaAs}$ . Одна особенность связана с геометрическим фактором. Учитывая, что  $\text{Se}$  по своим размерам ближе к  $\text{As}$ , чем  $\text{S}$ , он лучше подходит на роль примеси замещения  $\text{As}$ . Второй особенностью является то, что  $\text{S}$  в решетке  $\text{GaAs}$  проявляет большую химическую активность, чем  $\text{Se}$ . При имплантациях  $\text{Yb} + \text{Se} + \text{O}$  и  $\text{Yb} + \text{S} + \text{O}$  в разные участки одного и того же образца номенклатура серосодержащих центров, как правило, обширнее, чем в селеносодержащих. Это можно увидеть на рис. 1 и 2.

Энергетическая схема переходов доминирующих серо- и селеносодержащих центров на основе иона  $Yb^{3+}$  показана на рис. 4. На рис. 4.1 линия  $A$  соответствует основному состоянию РЗ иона  ${}^2F_{7/2}$ , которое на энергетической шкале мы приняли за нулевое. Линия  $B$  соответствует возбужденному состоянию  ${}^2F_{5/2}$  в приближении свободного иона (в вакууме). На рис. 4.2 показаны установленные нами экспериментально примерные границы спектральной области излучения центров на основе иона  $Yb^{3+}$  в решетке  $GaAs$  для "чисто" электронных переходов  ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$ . Линия  $C$  ( $9800 \text{ \AA}$ ;  $1,2648 \text{ eV}$ ) соответствует коротковолновой границе, а линия  $D$  ( $10200 \text{ \AA}$ ;  $1,2152 \text{ eV}$ ) – длинноволновой границе этой спектральной области. На рис. 4.3 – 4.7 показаны энергетические схемы центров с указанием величин соответствующих нефелоксетических сдвигов  $\delta$ .

Обратим внимание на то, что величина нефелоксетического сдвига между центрами  $S1$  и  $S2$ , а также  $Se1$  и  $Se2$  составляет  $\simeq 0,0024 \text{ eV}$ . Такая величина нефелоксетического сдвига – порядка  $1 \text{ meV}$  – вполне сопоставима с изменениями в спектральном положении линий, которое мы обычно связываем с влиянием структурных изменений на уровне второй координационной сферы. Отметим также, что центр  $S + Se$  лежит примерно посередине между центрами  $Se1$  и  $S1$ .

Мы полагаем, что среди элементов VIB группы Периодической системы просматривается распределение функций по отношению к иону  $Yb$ . Роль  $S$  и  $Se$  (а также  $Te$ ) заключается в следующем. Во-первых, они необходимы для образования иона  $Yb$  в зарядовом состоянии  $3+$ . Во-вторых, образуя устойчивые связи с ионом  $Yb$ , они удерживают его в зарядовом состоянии  $3+$  в разного рода процессах, происходящих в решетке  $GaAs$ , например, при проведении ФСО в широком температурном интервале. Эти соактиваторы входят в ближайшее окружение РЗ иона и во многом определяют тонкую структуру спектров излучения.

Основная же роль  $O$  заключается в том, что он способствует передаче энергии от электронно-дырочных пар иону  $Yb^{3+}$ , что обеспечивает возбуждение его  $4f$ -оболочки. Мы полагаем, что ионы  $O$  не входят в первую координационную сферу, а расположены, скорее всего, на уровне третьей координационной сферы.

Таким образом, проведение комбинированных имплантаций  $Yb, S, Se$  и  $O$  в кристаллы  $GaAs$  позволило выявить роль  $S$  и  $Se$  в образовании РЗ центров, а также номенклатуру основных доминирующих линий в РЗ спектрах, связанных с примесями  $S$  и  $Se$ . На основании полученных результатов предложены модели для центров на основе иона  $Yb^{3+}$ , ионов  $S$  и  $Se$ , а также  $O$ .

Авторы выражают благодарность В. А. Дравину за проведение имплантации наших

образцов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты 93-02-16122, 96-02-18206а) и программы "Физика твердотельных наноструктур" (проект 1-008).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ко н н о в В. М., Л а р и к о в а Т. В., Л о й к о Н. Н., У ш а к о в В. В. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 5 - 6, 50 (1995).
- [2] Ко н н о в В. М., Л о й к о Н. Н., Г и п п и у с А. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 9 - 10, 18 (1995).
- [3] С т р е л ь ч е н к о С. С., Л е б е д е в В. В. Соединения  $A^3B^5$ . Справочник, Москва, Металлургия, 1984 г., с. 37.

Поступила в редакцию 8 февраля 1996 г.