

УДК 621.315.592.3

ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ ЦЕНТРОВ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ Yb И O В КРИСТАЛЛЫ GaAs

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

Проведены исследования люминесценции центров на основе ионов Yb^{3+} , полученных при имплантации иттербия и кислорода в кристаллы GaAs. Начата классификация сложных центров на основе иттербий + фоновая примесь + кислород.

Обзор экспериментальных работ, посвященных системе GaAs : Yb, свидетельствует о том, что получить устойчивые и эффективные центры на основе ионов Yb^{3+} достаточно сложно [1-3]. Анализ приводимых в этих работах данных и наши предварительные результаты по активации центров иттербия в кристаллах GaAs [4] привели к выводу о том, что существенное влияние на фотолюминесценцию (ФЛ) ионов Yb^{3+} оказывают наборы и концентрации фоновых примесей в исходных кристаллах GaAs. Так, нами было установлено, что, если интегральная концентрация фоновых примесей в образце составляет $\sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$, то зафиксировать редкоземельное (РЗ) излучение в кристаллах GaAs, имплантированных Yb, как правило, не удастся. Оптическая активация Yb^{3+} наблюдается достаточно уверенно при концентрации фоновых примесей $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$. На наш взгляд, существенна и номенклатура фоновых примесей. Одной из самых важных среди этих примесей оказывается кислород.

Целью данной работы является описание "стандартного" спектра излучения Yb^{3+} в кристаллах GaAs. Делается попытка выработать экспериментальные критерии для выделения из всего РЗ спектра набора линий, которые можно было бы связать только с одним типом РЗ центра. С помощью этих критериев сделана предварительная классификация центров на основе ионов Yb^{3+} , введенных в кристаллы GaAs.

Нами были проведены несколько серий экспериментов. В первой серии исследовалась ФЛ образцов GaAs (концентрация фоновых примесей $\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$), одна половина

которых была имплантирована только Yb , а вторая – совместно иттербием и кислородом. Расчетные концентрации вводимых примесей составляли $10^{17} - 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Энергии ионов при имплантации подбирались таким образом, чтобы расчетные профили распределения ионов Yb и O по глубине образца были близки друг к другу. Режимы имплантации указаны в работе [4]. После имплантации часть образцов покрывали защитной пленкой Si_3N_4 толщиной 1500 \AA , а другую оставляли без защитного покрытия. Затем все образцы проходили фотостимулированный отжиг (ФСО) при фиксированной температуре 700°C в течение 5 минут, после чего защитную пленку удаляли и проводили измерения ФЛ при 77 K . Отметим, что существенной разницы в ФЛ образцов, прошедших ФСО под защитным покрытием и без него, мы не обнаружили, поэтому в дальнейшем все наши образцы проходили ФСО без защитного покрытия.

РЗ излучение было зафиксировано на обеих половинках наших образцов. Характерной особенностью полученных спектров являлось существенное увеличение интенсивности РЗ излучения при введении кислорода. Интенсивности РЗ излучения, полученные при совместной имплантации иттербия и кислорода ($Yb+O$), для разных образцов этой серии были примерно одинаковыми. В случае имплантации только одним Yb интенсивности одних и тех же линий излучения Yb^{3+} менялись от образца к образцу более чем на порядок. Общее число линий излучения, полученных в спектрах образцов при совместной имплантации $Yb+O$, было значительно больше, чем при имплантации только одним иттербием.

На рис. 1 показан обзорный спектр ФЛ образца $GaAs$, имплантированного $Yb+O$ до концентрации $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и прошедшего ФСО при 700°C длительностью 5 минут. Видно, что характерные линии излучения располагаются в двух спектральных областях $9800 - 10200 \text{ \AA}$ и $10400 - 10700 \text{ \AA}$. От образца к образцу прослеживается вполне определенная связь между линиями из первого и второго спектральных интервалов. Линии из первого спектрального интервала были, как правило, значительно более интенсивными, чем линии из второго. Линии из второго интервала начинали появляться только тогда, когда большинство линий из первого интервала достигали достаточно большой интенсивности при проведении ФСО с ростом температуры.

Для второй серии экспериментов были взяты кристаллы полуизолирующего $GaAs$ (как с хромом, так и без него). Концентрация фонового кислорода в этих образцах по данным SIMS (спектроскопии вторичных ионов) была менее 10^{17} см^{-3} . Одна половина каждого образца была имплантирована только одним Yb , а вторая – $Yb+O$. Эти образцы

были подвергнуты изохронному ФСО длительностью 5 минут с шагом в $20 - 40^\circ\text{C}$ от 500 до 750° .

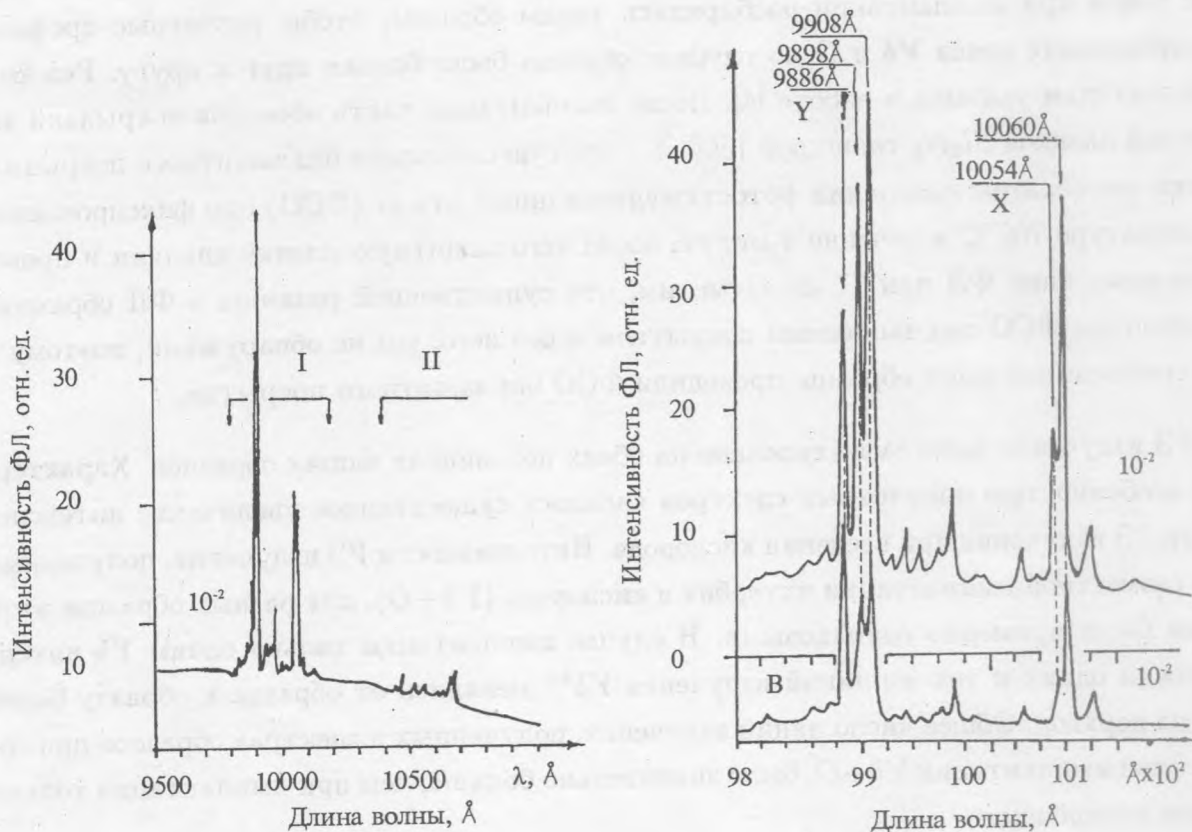


Рис. 1. Обзорный спектр ФЛ образца GaAs, имплантированного Yb+O до концентраций $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и прошедшего ФСО длительностью 5 минут при 700°C . I спектральный диапазон $9800 - 10200 \text{ \AA}$ - область "чисто" электронных переходов ${}^2F_{5/2} \rightarrow {}^2F_{7/2}$; II спектральный диапазон длин волн длиннее $\sim 10400 \text{ \AA}$ - область электронно-колебательных переходов.

Рис. 2. Спектры ФЛ двух образцов GaAs, имплантированных Yb+O до концентраций 10^{19} см^{-3} и прошедших ФСО длительностью 5 минут при 650°C . Образцы A и B отличаются разными наборами фоновых примесей. В спектре образца A доминируют Y1-центры, в спектре образца B - Y2-центры.

Во всем температурном интервале проведения ФСО для частей кристаллов с имплантацией только одним Yb никакого РЗ излучения зафиксировано не было. На частях кристаллов с имплантацией $Yb + O$ оптическая активация Yb^{3+} начиналась при температурах ФСО $550 - 580^\circ C$; она достигала максимума при температурах ФСО $650 - 680^\circ C$; при температурах отжига свыше $700^\circ C$ происходило быстрое гашение внутрицентральной люминесценции.

Аналогичная картина наблюдалась и для образцов первой серии. При этом такие изменения оптической активности Yb^{3+} в ходе проведения ФСО с ростом температуры ФСО характерны как при имплантациях Yb , так и при имплантациях $Yb + O$; как при наличии защитной пленки, так и без нее. Положение доминирующих линий в РЗ спектрах не зависело от дозы имплантированного кислорода. С ростом доз введенных ионов кислорода и иттербия росли интенсивности почти всех линий РЗ спектра. Сравнивая результаты по оптической активации ионов Yb^{3+} , полученные на образцах первой серии, с результатами, полученными на образцах второй серии, можно заключить, что оптическая активация Yb^{3+} при имплантации только одним Yb связана с наличием в образцах первой серии достаточно высоких концентраций фонового кислорода.

Практически для всех наших образцов в спектрах РЗ излучения первого спектрального интервала доминировали две группы линий: одна в районе $\sim 9900 \text{ \AA}$, другая - в районе $\sim 10050 \text{ \AA}$ (рис. 2). Участки спектра от 9800 до 9900 \AA и от 9920 до 10020 \AA были самыми динамичными и меняющимися как по числу линий, так и по интенсивности этих линий, как в ходе проведения ФСО, так и от образца к образцу. В области спектра $10100 - 10200 \text{ \AA}$ РЗ линии были заметны только для отдельных образцов и только на относительно ранних этапах ФСО.

Обозначим через X систему, состоящую не менее чем из трех линий с максимумами на 10060 , 10054 и $10048 - 10050 \text{ \AA}$ (рис. 3). Появление и характер изменений интенсивности линии 10060 \AA в зависимости от температуры ФСО коррелировали с появлением и характером изменений интенсивности линии 10672 \AA из второго спектрального интервала. Разница в энергетических положениях этих линий составляет $\simeq 70,6 \text{ мэВ}$. Эта пара линий становится заметной в спектрах после ФСО при $650 - 680^\circ C$. После ФСО при температурах свыше $700^\circ C$ эти линии начинают гаснуть, но скорость гашения этих линий оказывается самой малой по сравнению со всеми другими линиями РЗ спектра. Так, после ФСО при $730 - 750^\circ C$, когда практически гаснут все остальные линии РЗ спектра, эта пара линий доминирует во всем спектре. Эта пара линий наблюдалась практически во всех просмотренных нами образцах.

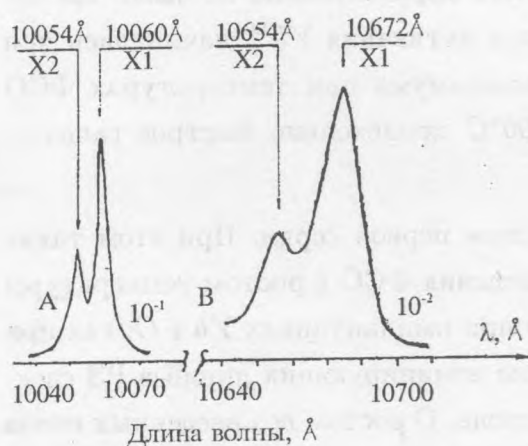


Рис. 3

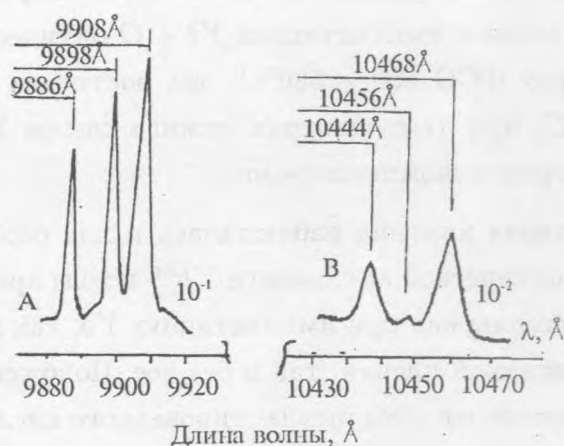


Рис. 4

Рис. 3. Линии излучения X1- и X2-центров на основе иона Yb^{3+} в кристаллах GaAs.

Рис. 4. Линии излучения Y1-центра на основе иона Yb^{3+} в кристаллах GaAs.

Появление и характер изменений интенсивности линии 10054 \AA коррелировали с появлением и характером изменений интенсивности линии 10654 \AA из второго спектрального интервала. Разница в энергетических положениях этих линий составляет $\approx 69,5 \text{ мэВ}$. Линия 10054 \AA появлялась на самых ранних этапах ФСО при температурах $\approx 580^\circ\text{C}$, а линия 10654 \AA – при температурах $\approx 600^\circ\text{C}$. Эти линии достигали максимальной интенсивности после ФСО при температурах $640 - 650^\circ\text{C}$, а затем очень быстро гасли с ростом температуры ФСО, так, что после проведения ФСО при 700°C они, как правило, исчезали из РЗ спектра. Пару линий 10054 и 10654 \AA мы наблюдали примерно у половины из всех просмотренных нами образцов. Линия $10048 - 10050 \text{ \AA}$ менее заметна в спектрах, чем линия 10054 \AA . Ее поведение в ходе проведения ФСО практически аналогично поведению линии 10054 \AA .

Разная термостабильность набора линий 10054 и 10654 \AA и набора линий 10060 и 10672 \AA , а также разные величины сдвига между ними ($69,5$ и $70,6 \text{ мэВ}$) позволяют сделать предположение, что эти два набора линий связаны с близкими, но разными центрами на основе иона Yb^{3+} . Обозначим X1 – центр, связанный с линиями 10060 и 10672 \AA , а X2 – центр, связанный с линиями 10054 и 10654 \AA . Отметим, что при равных интенсивностях линий 10054 и 10060 \AA , интенсивность линии 10654 \AA всегда была ниже

интенсивности линии 10672 Å примерно в 2–3 раза.

Из первого спектрального интервала также следует выделить набор линий, расположенный в районе 9900 Å. В спектрах с высоким разрешением $\delta \sim 0,3 \text{ Å}$ хорошо видна четверка линий: 9886, 9898, 9906 и 9908 Å. Обычно интенсивности линий 9898, 9906 и 9908 Å оказывались одного порядка, а интенсивность линии 9886 Å существенно уступала им по величине. Центр с указанными выше линиями и таким распределением интенсивности между ними обозначим как Y1. В спектрах с более низким разрешением $\delta \sim 3 \text{ Å}$, линии 9906 и 9908 Å сливаются в одну с максимумом на $\simeq 9907 \text{ Å}$ и интенсивностью, превышающей интенсивность линии 9898 Å (рис. 4).

Эти линии появлялись в РЗ спектрах после ФСО при температуре порядка 620°C . ФСО образцов в температурном интервале $620 - 680^\circ\text{C}$ приводил, чаще всего, к росту интенсивностей всего набора линий Y1. По мере роста температуры ФСО свыше 700°C эти линии синхронно гасли.

В зависимости от температуры ФСО появление и изменения интенсивностей этих линий коррелировали с появлением и изменениями в интенсивностях другого набора линий, лежащих на 10444, 10456 и 10468 Å. Чаще всего, в спектрах уверенно видны линии 10444 и 10468 Å, а линия 10456 Å только угадывалась. Расстояние между линиями первой и второй тройки составляет $\simeq 67 \text{ мэВ}$.

Встречались, хотя и достаточно редко, образцы, у которых с самого начала проведения ФСО среди линий 9886, 9898, 9907 Å доминировала линия 9886 Å. Обозначим центр с таким распределением интенсивностей среди линий как Y2 (рис. 2). При проведении ступенчатого ФСО на некоторых образцах происходила замена центров Y1 на Y2 при температуре в районе 650°C . Области температурной устойчивости центров Y1 и Y2 слабо отличаются друг от друга.

Центры типа X и Y доминировали в спектрах РЗ излучения кристаллов GaAs , имплантированных либо Yb, либо Yb + O, независимо от происхождения и метода получения исходных кристаллов. Можно предположить, что своим происхождением эти центры обязаны наличию в кристаллах самых распространенных фоновых примесей, скорее всего, элементов IV и VI групп Периодической системы.

Проведенная в этой работе классификация излучающих центров на основе ионов Yb^{3+} , имплантированных в кристаллы GaAs , основана на следующих экспериментальных данных:

- 1) положение линий в спектрах РЗ излучения для образцов с различным примесно-дефектным составом;

2) зависимость интенсивностей линий РЗ излучения от температуры изохронного ФСО для линий как из первого спектрального интервала, так и из второго;

3) взаимосвязь между линиями из первого и второго спектральных интервалов.

На наш взгляд, если линии, входящие в первый спектральный интервал, можно описать в рамках "чисто" электронных переходов между штатовскими компонентами термов ${}^2F_{5/2}$ и ${}^2F_{7/2}$, расщепленных кристаллическим полем, то для описания линий второго спектрального интервала потребуются учет и колебаний ионов, образующих это локальное кристаллическое поле. Несмотря на то, что учет электрон-фононного взаимодействия затрудняет решение теоретической задачи по расчетам спектров РЗ ионов, наличие локальных фононных повторений способствует классификации сложных центров на основе ионов Yb^{3+} .

Наблюдаемая в экспериментах зависимость появления или гашения тех или иных линий излучения Yb^{3+} в спектрах ФЛ от температуры ФСО позволяет сделать вывод о возможности получения РЗ спектров образцов $GaAs:Yb$ только с одним типом центров путем изменения температуры отжига. Например, при относительно низкотемпературном отжиге ($580 - 600^\circ C$) в спектрах РЗ излучения присутствуют 2-3 линии; при относительно высокотемпературном отжиге ($720 - 750^\circ C$) в спектрах РЗ излучения доминирует только одна линия, чаще всего, линия 10060 \AA (и ее фононное повторение на 10672 \AA).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 93-02-16122).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Benyattou T., Seghier D., Bremond G., et al., Mat. Res. Soc. Symp. Proc., **301**, 163 (1993).
- [2] Taguchi A., Takahai K., and Nakata J., Mater. Res. Soc. Symp. Proc., **301**, 139 (1993).
- [3] Kozanekski A., Langer J. M., and Peaker A. R., Acta Physica Polonica A, **83**, no. 1, 59 (1993).
- [4] Кононов В. М., Лойко Н. Н., Дравин В. А. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3-4, 23 (1994).

Поступила в редакцию 9 февраля 1995 г.