

УДК 621.315.592.3

## ВЛИЯНИЕ ПРОТОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЮ GaAs, ИМПЛАНТИРОВАННОГО Yb И O

В. М. Коннов, Т. В. Ларикова, Н. Н. Лойко, В. В. Ушаков, Б. В. Фармери

*Кристаллы GaAs с характеристическим редкоземельным излучением Yb<sup>3+</sup> были подвергнуты облучению протонами. После этой обработки и фотостимулированного отжига были получены новые типы центров на основе Yb<sup>3+</sup> + фоновая примесь + кислород.*

В этой работе мы продолжаем описание центров типа иттербий + фоновая примесь + кислород (Yb + ФП + O), образованных при имплантациях либо Yb, либо Yb и O в кристаллы GaAs [1].

Предпринята попытка реконструкции спектра редкоземельного (РЗ) излучения путем облучения таких кристаллов протонами (H<sup>+</sup>).

Идея такой протонной обработки образцов заключается в следующем. Обычно для восстановления кристаллической решетки GaAs и для оптической активации ионов Yb<sup>3+</sup> необходим термоотжиг при температурах ~ 600°C и выше. По нашему мнению, излучательные РЗ центры образуются в ходе проведения отжига путем диффузии фоновых примесей из нарушенного имплантацией слоя в область расположения РЗ ионов, и уже здесь идет образование сложных центров типа Yb<sup>3+</sup> + фоновая примесь (Yb + ФП). Протонной бомбардировкой можно существенно увеличить глубину нарушенного слоя в кристалле по сравнению с той, которая достижима при имплантациях тяжелыми ионами. Тогда можно надеяться как на увеличение числа линий РЗ излучения, так и на рост их интенсивности.

В качестве исходных образцов служили полуизолирующие кристаллы GaAs с концентрацией фонового кислорода на уровне ~ 10<sup>18</sup> см<sup>-3</sup>. Половина каждого образца была имплантирована только Yb, а другая половина – совместно иттербием и кислородом

( $Yb + O$ ). Расчетные концентрации вводимых примесей составляли  $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Энергии ионов при имплантациях подбирались таким образом, чтобы расчетные профили распределения ионов  $Yb$  и  $O$  по глубине образца были близки друг к другу. Режимы имплантации указаны в работе [2]. Глубина слоя, содержащего имплантированные ионы, составляла  $\simeq 1500 - 1700 \text{ \AA}$ ; толщина же нарушенного слоя, по нашей оценке, составляла  $5000 - 6000 \text{ \AA}$ . После имплантации образцы покрывали защитной пленкой из  $Si_3N_4$  толщиной  $\sim 1500 \text{ \AA}$  и подвергали фотостимулированному отжигу (ФСО) при температуре  $720^\circ C$  в течение 5 минут. Затем пленку  $Si_3N_4$  удаляли и проводили измерения ФЛ при  $77 \text{ K}$ .

РЗ излучение было зафиксировано на обеих половинках образцов. Эти спектры мы будем называть "стартовыми". Характерной особенностью зарегистрированных спектров являлось существенное увеличение интенсивностей РЗ линий при введении кислорода.

На второй стадии эксперимента образцы облучались протонами. Облучение протонами проводилось Б. П. Фармери в лаборатории Сассекского университета (Великобритания). Энергия  $H^+$  при облучении составляла  $\sim 1 \text{ МэВ}$ , а доза  $\sim 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . При таких энергиях грубая оценка толщины разупорядоченного слоя показывает, что он составляет  $\sim 12 \text{ мкм}$ . Дополнительному облучению  $H^+$  подвергалась половина каждого образца.

В результате каждый образец состоял из 4 частей:

- 1) облученной  $Yb + O$  - часть А;
- 2) облученной  $Yb + O + H^+$  - часть В;
- 3) облученной  $Yb$  - часть С;
- 4) облученной  $Yb + H^+$  - часть D.

После облучения  $H^+$  образцы были подвергнуты изохронному ФСО в интервале температур  $400 - 750^\circ C$  с шагом  $30 - 50^\circ C$  и длительностью каждого шага 5 минут. Отжиг проводился без защитного покрытия.

На частях образцов, необлученных  $H^+$  (части А и С), после ФСО при  $400^\circ C$  были получены спектры излучения  $Yb^{3+}$  почти идентичные соответствующим стартовым спектрам (рис. 1). В обоих спектрах доминировали линии, относящиеся к X и Y центрам [1]. В диапазоне температур ФСО от  $400^\circ C$  до  $500 - 550^\circ C$  интенсивности всех линий РЗ спектра падали по сравнению со своими стартовыми значениями. В диапазоне температур ФСО от  $550$  до  $650^\circ C$  интенсивности всех линий РЗ спектра быстро росли и превышали после ФСО при  $650^\circ C$  свои стартовые значения. Изменения на

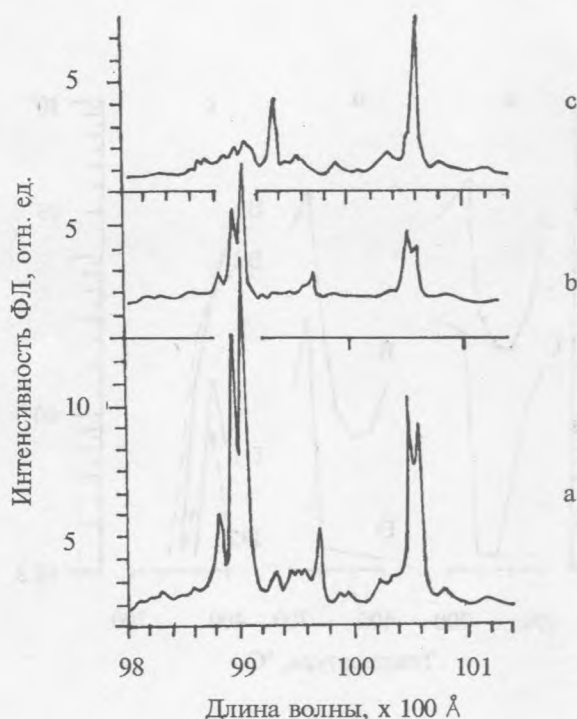


Рис. 1. Спектры излучения иона  $Yb^{3+}$  в образце  $GaAs$ , облученном  $Yb + O$  (часть А): а) – "стартовый спектр" и спектр после ФСО при  $400^\circ C$ ; б) – после ФСО при  $550^\circ C$ ; в) – после ФСО при  $700^\circ C$ .

качественном уровне произошли в этих спектрах после ФСО при  $700^\circ C$ . Эволюция интенсивности линии  $10060 \text{ \AA}$ , связанной с X1 центром, с ростом температуры ФСО для частей кристаллов А и С показана на рис. 2а.

Изменения спектров РЗ излучения для частей кристаллов А и С с ростом температуры ФСО в диапазоне температур  $400 - 650^\circ C$  мы связываем с разбеганием, прежде всего, точечных дефектов, а затем и фоновых примесей из разупорядоченных протонной бомбардировкой частей кристаллов В и D по всему объему кристалла. Отметим, что характер кривых отжига в интервале температур  $550 - 700^\circ C$  аналогичен тому, что описан в работе [1].

Части кристаллов, прошедшие дополнительное облучение  $H^+$  (части В и D), сразу после такой обработки, в отличие от частей кристаллов А и С, не люминесцировали (рис. 3). Спектр ФЛ удалось зарегистрировать только после ФСО при  $400^\circ C$ . В спектрах доминировали линии  $9964$  и  $9972 \text{ \AA}$ , входящие в первый спектральный интервал,

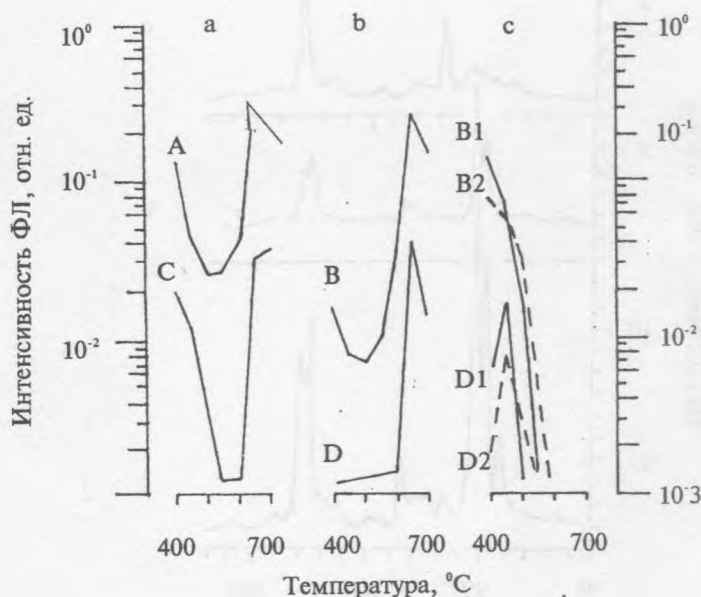


Рис. 2. а, б) Изменения интенсивности линии излучения иона  $Yb^{3+}$  на длине волны  $10060 \text{ \AA}$  в зависимости от температуры ФСО для различных частей кристалла GaAs. А – часть, облученная  $Yb + O$ ; В – часть, облученная  $Yb + O + H^+$ ; С – часть, облученная  $Yb$ ; D – часть, облученная  $Yb + H^+$ ; в) Изменения интенсивностей линии  $9964 \text{ \AA}$  (B1, D1) и линии  $9972 \text{ \AA}$  (B2, D2) в ходе проведения ФСО для частей кристалла, облученных  $Yb + O + H^+$  (часть В) и  $Yb + H^+$  (часть D).

и линии  $10512$  и  $10536 \text{ \AA}$  из второго спектрального интервала. Причем линия  $9964 \text{ \AA}$  оказалась связанной с линией  $10512 \text{ \AA}$ , а линия  $9972 \text{ \AA}$  – с линией  $10536 \text{ \AA}$ . Расстояния между этими парами линий составляют  $\approx 64 \text{ мэВ}$  и  $67 \text{ мэВ}$  соответственно. После проведения ФСО при  $400^\circ\text{C}$  линия  $9964 \text{ \AA}$  оказалась интенсивнее линии  $9972 \text{ \AA}$ . Заметны следы линий, относящихся к X и Y центрам. С ростом температуры ФСО происходило уменьшение интенсивностей линий  $9964$  и  $9972 \text{ \AA}$ , но скорости гашения оказались разными. При температуре ФСО  $\sim 500^\circ\text{C}$  доминирующей в спектрах становилась линия  $9972 \text{ \AA}$  и связанная с ней линия  $10536 \text{ \AA}$ . Такая зависимость интенсивностей линий от температуры ФСО и различные величины сдвигов между линиями  $9964 \text{ \AA}$  и  $10512 \text{ \AA}$  и линиями  $9972 \text{ \AA}$  и  $10536 \text{ \AA}$ , по-видимому, связаны с тем, что здесь имеют место близкие, но различные центры на основе ионов  $Yb^{3+}$ . Центр, спектральное положение

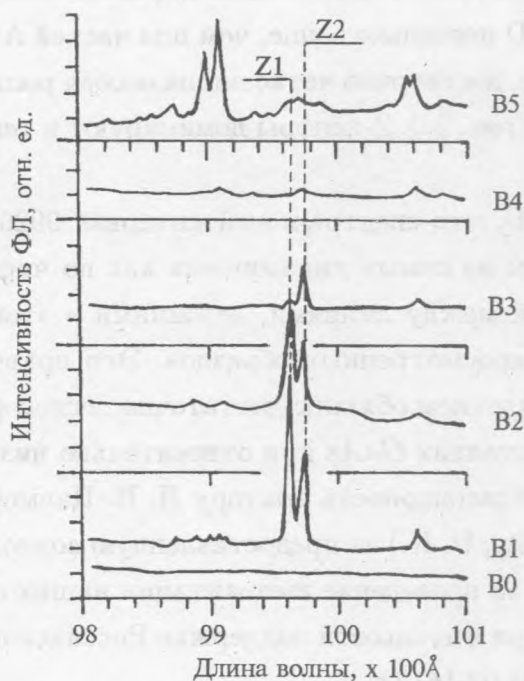


Рис. 3. Спектры излучения иона  $Yb^{3+}$  в образце  $GaAs$ , облученном  $Yb + O + H^+$  (часть В):  $B_0$  – после облучения  $H^+$ ;  $B_1$ – $B_5$  – после ФСО при соответствующих температурах:  $B_1$  –  $400^\circ C$ ;  $B_2$  –  $450^\circ C$ ;  $B_3$  –  $500^\circ C$ ;  $B_4$  –  $550^\circ C$ ;  $B_5$  –  $600^\circ C$ .

которого задается парой линий 9964 и 10512 Å, обозначим как Z1. Центр, спектральное положение которого задается парой линий 9972 и 10536 Å, обозначим как Z2.

Z-центры доминировали в спектрах РЗ излучения частей кристаллов В и Д, отожженных в температурном интервале 400 – 550°C. При температурах ФСО выше 550°C в спектрах начинали доминировать X и Y центры (рис. 3, 2b). Изменения спектров РЗ излучения были аналогичны тем, что наблюдались для частей кристаллов А и С.

Можно подвести некоторые итоги.

На всех частях кристаллов интенсивности основных линий РЗ излучения при оптимальной температуре ФСО ( $\approx 650^\circ C$ ) превысили свои стартовые значения. Но, возможно, влияние дополнительной протонной обработки продолжает сказываться и здесь. На рисунке 2 видно, что интенсивности РЗ излучения для части кристалла А несколько

выше, чем для части В, а для части С – выше, чем для части D. Это, на наш взгляд, связано с тем, что концентрация остаточных дефектов после имплантации и ФСО для частей кристаллов В и D несколько выше, чем для частей А и С. Для Z-центров, так же как и для X и Y центров, достаточно четко видна особая роль O в оптической активации центров типа Yb + ФП (рис. 2с). Z-центры доминируют в температурном интервале 400 – 550°С.

Мы уже отмечали [1], что спектральный интервал 9920 – 9980 Å при ФСО свыше 600°С оказывался одним из самых динамичных как по числу линий, так и по соотношениям интенсивностей между линиями, лежащими в этом спектральном интервале, практически для всех просмотренных образцов. Это привело к мысли о том, что Z-центры своим происхождением обязаны достаточно легкой фоновой примеси, способной диффундировать в кристаллах GaAs при относительно низких температурах ФСО.

Авторы выражают благодарность доктору Д. В. Палмеру (Physical and Astronomy Division, Sussex University, U. K.) за предоставленную возможность совместной работы, а также В. А. Дравину за проведение имплантации наших образцов.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Дравин В. А., Коннов В. М., Ларикова Т. В., Лойко Н. Н. Краткие сообщения по физике ФИАН, N 5 – 6, 18 (1995).
- [2] Коннов В. М., Лойко Н. Н., Дравин В. А., Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3 – 4, 23 (1994).

Поступила в редакцию 16 февраля 1995 г.