

УДК 621.315.592

## ОСОБЕННОСТИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ GaP, ИМПЛАНТИРОВАННОГО ИТТЕРБИЕМ

В. М. Коннов, Н. Н. Лойко

*Проведены исследования фотолюминесценции (ФЛ) GaP, ионнолегированного только Yb или Yb и одним из соактиваторов (O, F, Li). При температурах отжига образцов 700 – 750°C тонкая структура спектров редкоземельного (РЗ) излучения зависит от дозы имплантации Yb. При температурах отжига выше 800°C спектры ФЛ становятся похожими друг на друга независимо от дозы имплантации.*

В статьях [1, 2] сообщалось о влиянии различных примесей на излучательные характеристики фосфида индия и арсенида галлия, имплантированных иттербием. Было показано, что дополнительное введение примесей (O, F или Li) в кристаллы GaAs и InP не влияет на тонкую структуру спектров излучения редкоземельной примеси, но присутствие O в образцах приводит к увеличению интенсивности излучения иона  $Yb^{3+}$ .

Данная работа является продолжением исследований влияния различных примесей на люминесцентные свойства полупроводниковых материалов, имплантированных РЗ примесью.

С этой целью изучалась фотолюминесценция образцов GaP, имплантированных только Yb или совместно Yb и одним из соактиваторов O, F или Li. Методика подготовки образцов и режимы имплантации описаны ранее [1, 2]. Измерения ФЛ проводились при 77 К.

После фотостимулированного отжига (ФСО) образцов GaP с расчетной концентрацией имплантированного  $Yb \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$  в спектрах РЗ излучения наблюдались два типа линий (рис. 1). Линии типа 1 – узкие и интенсивные линии, расположенные в спектральном диапазоне от 9800 Å до 10700 Å. Полуширина этих линий на полувысоте составляла не более 1 Å. Линии типа 2 группируются в целые полосы в областях 9900

$\text{\AA}$ , 9960 – 9980  $\text{\AA}$ , 10040 – 10130  $\text{\AA}$ , 10310  $\text{\AA}$  и 10380  $\text{\AA}$  и имеют полуширину на полувывсоте порядка нескольких ангстрем. Отметим, что тонкая структура спектров менялась в зависимости от температуры проводимого ФСО. Так, в температурном диапазоне 700 – 800°С спектр излучения каждого образца имел свой индивидуальный характер, но при температурах отжига выше 800°С спектры ФЛ были одинаковыми для всех образцов (рис. 1а, б, в).

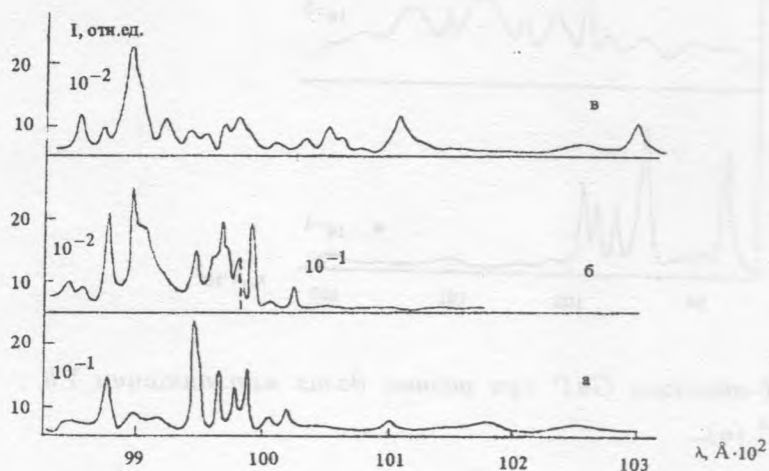


Рис. 1. Спектры ФЛ образца  $GaP$  с расчетной концентрацией  $Yb \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$  после ФСО при температурах 700°С (а), 800°С (б) и 850°С (в).

Изменения тонкой структуры спектров ФЛ иона  $Yb^{3+}$  в кристаллах  $GaP$ , отожженных при 750°С, в зависимости от дозы имплантации показаны на рис. 2. Видно, что для образцов с расчетной концентрацией  $Yb \sim 10^{17} \text{ см}^{-3}$  характерен спектр, в котором доминируют линии типа 1, особенно 9988  $\text{\AA}$ , и выделяются линии 9878  $\text{\AA}$  и 9936  $\text{\AA}$ , а также заметен ряд линий типа 2. При увеличении концентрации имплантированной примеси до  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  в спектрах ФЛ из линий типа 1 присутствует только 9988  $\text{\AA}$  и проявляется тенденция к образованию полос на трех участках спектра: 10016 – 10030  $\text{\AA}$  с полушириной на полувывсоте  $\sim 10 \text{\AA}$  и максимумом на 10016  $\text{\AA}$ ; 10070 – 10090  $\text{\AA}$  с полушириной на полувывсоте  $\sim 20 \text{\AA}$  и максимумом на 10076  $\text{\AA}$ ; 10020 – 10030  $\text{\AA}$  с полушириной на полувывсоте  $\sim 10 \text{\AA}$  и максимумом на 10030  $\text{\AA}$  (рис. 2б). На рис. 2в представлен спектр ФЛ образца  $GaP$  с расчетной концентрацией  $Yb \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . В спектре доминирует широкая полоса с основным максимумом на 10080  $\text{\AA}$  и с полушириной на полувывсоте  $\sim 70 \text{\AA}$  и заметна точка перегиба на 10040  $\text{\AA}$ ; в коротковолновом крыле этой полосы

видны следы линий типа 1.

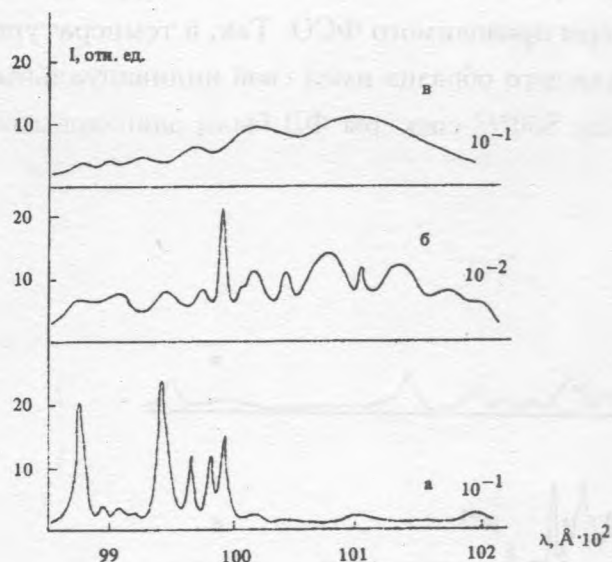


Рис. 2. Спектры ФЛ образцов  $GaP$  при разных дозах имплантации  $Yb$ :  $10^{17} \text{ см}^{-3}$  (а),  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  (б),  $10^{19} \text{ см}^{-3}$  (в).

Повышение температуры ФСО привело к изменению тонкой структуры спектров излучения иона  $Yb^{3+}$  в образцах  $GaP$ , а именно к распаду полос. Так, для образцов с расчетной концентрацией  $Yb \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  полоса распадается при  $750^\circ\text{C}$ , для образцов с концентрацией  $Yb \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  – при  $800^\circ\text{C}$ . Изменения тонкой структуры РЗ спектров для образцов с расчетной концентрацией  $Yb \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$  в зависимости от температуры отжига показаны на рис. 3. Отметим, что при температурах отжига более  $800^\circ\text{C}$  спектры становятся похожими друг на друга независимо от дозы имплантации (рис. 1в и рис. 3в).

Таким образом, тонкая структура спектров ФЛ образцов  $GaP$ , ионнолегированных  $Yb$ , зависит от дозы имплантации только при температурах отжига  $700 - 750^\circ\text{C}$ . Так при дозах имплантации  $Yb \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$  в спектрах ФЛ заметно образование полос, которое становится доминирующим при увеличении дозы имплантации на порядок. Аналогичные спектры ФЛ наблюдали для  $InP$  и  $GaP$ , имплантированных  $Yb$  [3, 4]. Полагают, что эти полосы связаны с изолированным ионом  $Yb^{3+}$ , замещающим  $Ga$  или  $In$  в подрешетке металла, а следовательно, имеющим симметрию  $T_d$ . Однако в отличие от  $GaP$ , для  $InP$  такое излучение не зависит от дозы имплантации.

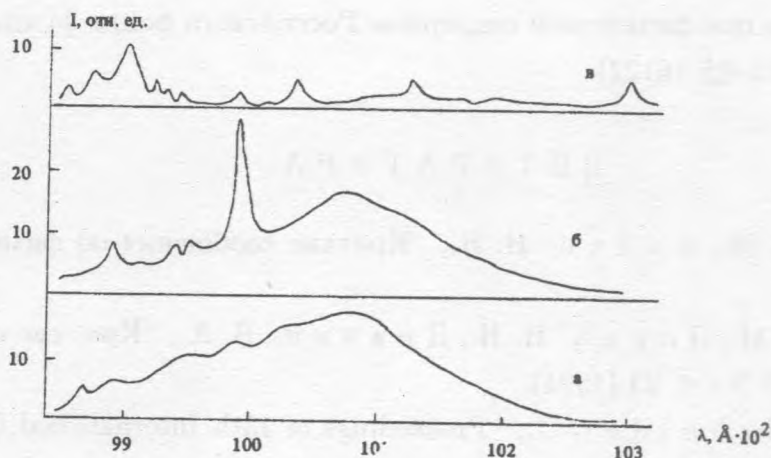


Рис. 3. Спектры ФЛ образцов  $GaP$  с расчетной концентрацией  $Yb \sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , отожженных соответственно при  $650^\circ\text{C}$  (а),  $750^\circ\text{C}$  (б) и  $850^\circ\text{C}$  (в).

Возможна и другая интерпретация появления полос в спектрах ФЛ  $GaP$ , имплантированных  $Yb$ . В ионных кристаллах при высоких концентрациях РЗ ионов образуется множество близких типов РЗ центров, излучение которых перекрывается, и в спектрах ФЛ наблюдаются относительно широкие полосы. Существенную роль при этом играют следующие факторы: межцентровое взаимодействие, возрастание роли электрон-фононного взаимодействия и колебаний энергии возбуждения различных РЗ центров. Отметим, что центры кубической симметрии наблюдались также в полупроводниках  $A_2B_6$ , но в роли ближайших соседей оказывались не решеточные, а примесные атомы. Роль дефектов в образовании широкополосного излучения, по-видимому, невелика, поскольку известно, что отжиг кристаллов  $GaP$  при температурах выше  $700^\circ\text{C}$  приводит к полному восстановлению кристаллической решетки. Проведенный анализ фоновых примесей в исследуемых кристаллах показал наличие в основном элементов IV и VI групп с концентрацией выше  $10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Учитывая склонность РЗ элементов к комплексообразованию, можно предположить, что наблюдаемые в спектрах ФЛ полосы связаны с образованием комплексов типа  $Yb^{3+} + X_i$ , где  $X_i$  – атомы IV и VI группы.

К сожалению, наличие в кристаллах  $GaP$  высокой концентрации фоновых примесей не позволило выяснить роль соактиваторов, введение которых не привело к существенным изменениям ни в интенсивности РЗ излучения, ни в тонкой структуре



спектров ФЛ.

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

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ко н н о в В. М., Ло й к о Н. Н., Краткие сообщения по физике ФИАН, N 11-12, 63 (1993).
- [2] Ко н н о в В. М., Ло й к о Н. Н., Д р а в и н В. А., Краткие сообщения по физике ФИАН, N 3 - 4, 23 (1994).
- [3] Е п п е н Н., S c h e i d e r J., Proceedings of 13th International Conference on Defects in Semiconductors, Cornado, California, 155 (1984).
- [4] Е р м а к о в Л. К., К а с а т к и н В. А., П а с е ч н и к Л. П., Оптика и спектроскопия, 57(1), 11 (1984).

Поступила в редакцию 28 июля 1994 г.