

Оптическая активность Yb в GaAs и низкоразмерных структурах на основе GaAs/GaAlAs

© А.А. Гиппиус, В.М. Коннов, В.А. Дравин, Н.Н. Лойко, И.П. Казаков, В.В. Ушаков

Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук,
117924 Москва, Россия

(Получена 15 декабря 1998 г. Принята к печати 15 декабря 1998 г.)

Показано, что оптическая активация Yb в GaAs и низкоразмерных структурах на основе GaAs/GaAlAs может быть достигнута путем формирования трехкомпонентных (Yb + S/Se/Te + O) центров люминесценции на базе иона Yb³⁺. Обнаружена корреляция характеристик таких центров с параметрами соактиваторов-халькогенов. Показано, что кислород играет определяющую роль в процессе передачи энергии электронно-дырочных пар центрам люминесценции.

Исследования редкоземельных элементов (РЗЭ) как примесей в полупроводниках мотивированы перспективами создания оптоэлектронных устройств, объединяющих характеристики излучения, свойственные внутрицентровым оптическим переходам в пределах 4*f*-оболочки (узкие, температурно стабильные линии), с компактностью полупроводниковых приборов. Интенсивность *f*–*f*-люминесценции в полупроводниках, легированных РЗЭ, определяется, в частности, вероятностью оптических переходов в пределах 4*f*-оболочки РЗ центров и эффективностью передачи энергии электронно-дырочных пар центрам люминесценции. Оба этих фактора зависят от структуры центров люминесценции, т. е. от положения РЗ примеси в кристаллической решетке и ее возможной ассоциации с другими примесями и (или) дефектами.

Данная публикация резюмирует результаты исследований центров люминесценции на основе иона Yb³⁺ в GaAs и низкоразмерных структурах на основе GaAs/GaAlAs, выполненных в Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН на протяжении последних трех лет. Результаты предшествующих работ других авторов сводились к тому, что Yb в бинарных и тройных соединениях III–V может быть оптически активным, лишь находясь в узлах решетки [1]. На основе таких представлений весьма малая интенсивность люминесценции, связанной с ионами Yb³⁺ в GaAs, объяснялась малой долей (как это следовало из данных резерфордовского рассеяния) замещающих ионов Yb. Нам удалось показать, что Yb может быть оптически активным в GaAs, находясь в составе ассоциаций с другими примесями.

Примесь Yb вводилась в GaAs и структуры GaAs/GaAlAs либо методом ионной имплантации, либо в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии (МЛЭ). Имплантация проводилась с использованием наборов энергий и доз ионов, обеспечивавших "плоский" профиль распределения примеси Yb и соактиваторов (O, S, Se, Te) вплоть до глубины 150 нм с концентрацией в пределах (10¹⁷ ÷ 10¹⁹) см⁻². Для устранения радиационного повреждения, вносимого имплантацией, образцы отжигались при температурах вплоть до 800°С. При легировании в процессе МЛЭ был выработан

компромиссный режим роста, позволяющий вводить Yb в концентрации до 10¹⁸ см⁻³, при приемлемом качестве кристаллической матрицы.

На начальной стадии данной работы были выполнены систематические исследования условий формирования центров люминесценции на основе ионов Yb³⁺ в монокристаллах GaAs с различным содержанием фоновых примесей (контролируемым методом SIMS — масс-спектроскопии вторичных ионов). Было установлено, что при имплантации Yb в материал со сравнительно низким (< 10¹⁷ см⁻³) содержанием фоновых примесей центры люминесценции, связанные с иттербием, не возникают в согласии с имеющимися литературными данными. Дополнительная имплантация кислорода приводила к появлению линий люминесценции в спектральном интервале, соответствующем переходам ²F_{5/2}–²F_{7/2} иона Yb³⁺. В случае материала с большим (~ 10¹⁸ см⁻³) содержанием фоновых примесей (Se, O, Si, C др.) люминесценция, связанная с *f*–*f*-переходами Yb³⁺, наблюдалась после имплантации только лишь ионов Yb, при этом ее интенсивность отличалась более чем на порядок для различных (идентично имплантированных) образцов данной группы. Дополнительная имплантация кислорода резко повышала интенсивность люминесценции и уменьшала ее разброс для разных образцов. Из этих данных следовало, что кислород играет решающую роль в процессе "оптической активации" Yb в GaAs.

На основании данных, относящихся к разным образцам и различным условиям имплантации и отжига, в спектральной области (980 ÷ 1020) нм, т. е. (1.264 ÷ 1.215) эВ (где в некоторых образцах наблюдалось до ста линий), удалось выделить несколько наиболее заметных групп линий (X₁/X₂, Y₁/Y₂), относящихся к различным центрам (рис. 1, а). С линиями X₁/X₂ и Y₁/Y₂ систем коррелировали значительно менее интенсивные линии в области (1030 ÷ 1100) нм, т. е. смещенные в сторону меньших энергий примерно на 70 мэВ и приписанные оптическим переходам с участием фононов.

Появление различных комбинаций линий в спектрах люминесценции разных, но идентично (Yb + O) имплантированных и отожженных образцов указывало на возможное участие в формировании на базе ионов Yb³⁺

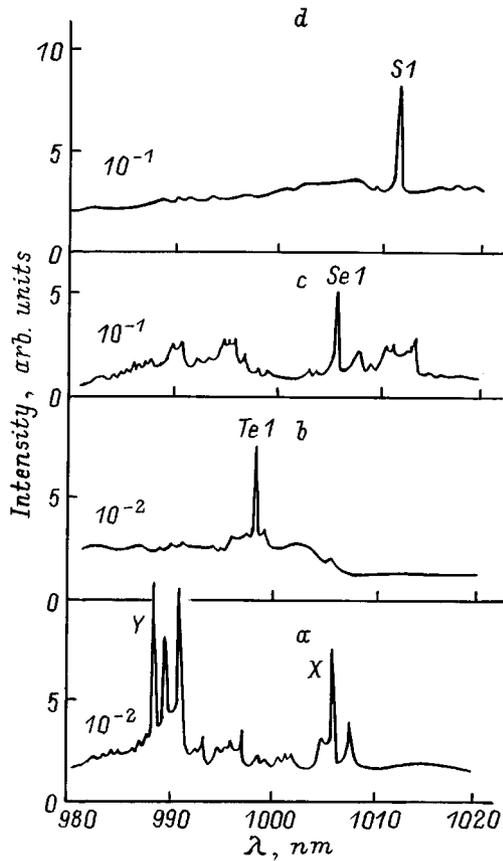


Рис. 1. Спектры люминесценции, связанные с переходами (${}^2F_{5/2} - {}^2F_{7/2}$) ионов Yb^{3+} в GaAs для различных комбинаций имплантированных примесей (концентрация каждой 10^{19} см^{-3}): *a* — Yb+O, *b* — Yb+Te+O, *c* — Yb+Se+O, *d* — Yb+S+O. Температура отжига, °C: *a, b* — 700; *c, d* — 660.

центров люминесценции, включающих фоновые примеси (Se, O, Si, C и др.), детектируемые методом SIMS в части исследованных образцов. Совместная имплантация Yb, кислорода и одного из халькогенов (S, Se, Te) в образцы с малым содержанием фоновых примесей привела к появлению линий люминесценции, специфичных для каждого из халькогенов (рис. 1, *b, c, d*). Таким образом, оптическая активация Yb в GaAs может быть достигнута путем формирования на базе иона Yb^{3+} трехкомпонентных (Yb + S/Se/Te + O) люминесцентных комплексов, образующихся в результате, по-видимому, достаточно сложных реакций между их компонентами в процессе отжига [2,3].

Характеристики однотипных трехкомпонентных комплексов коррелируют со свойствами входящих в их состав атомов-халькогенов. Так, температура отжига, при которой образуются комплексы (Yb + S/Se/Te + O), увеличивается (580/620/650 °C) с увеличением массы халькогена. Как видно из таблицы, энергия оптического перехода увеличивается с увеличением размера входящего в состав

центра атома-халькогена, а энергия фонона уменьшается по мере увеличения его массы.

Роль халькогенов в оптической активации Yb заключается, по-видимому, как в формировании определенного зарядового состояния РЗ иона (Yb^{3+}), так и в создании кристаллических полей низкой симметрии, зависящих от параметров соактиватора и снимающих запрет по четности для $f-f$ -переходов. Что касается кислорода (входящего в состав всех без исключения исследованных центров люминесценции), то не ясно, влияет ли он вообще на их энергетический спектр. Не исключено, что он каким-то образом участвует в процессе передачи энергии возбуждения системы электронно-дырочных пар центрам люминесценции.

Интенсивность люминесценции, связанной с трехкомпонентными центрами в GaAs, сравнима с интенсивностью в системе GaP:Yb и даже InP:Yb (где высокая интенсивность люминесценции связывается с замещающим положением изолированных атомов Yb). Это дает основание предположить, что положение редкоземельных атомов в решетке является не единственным (и, возможно, даже не основным) фактором, определяющим их оптическую активность в том случае, если они входят в состав люминесцентных комплексов.

Формирование центров люминесценции в слоях GaAs, легированных Yb в процессе молекулярно-лучевой эпитаксии, происходит в целом так же, как и в объемном материале: люминесценция, связанная с $f-f$ -переходами Yb^{3+} , наблюдается только после имплантации кислорода и отжига [4]. В спектре наблюдаются многочисленные линии, связанные с центрами, включающими Yb, O и фоновые примеси, в частности Se (рис. 2).

Для создания в квантово-размерных структурах на основе GaAs/GaAlAs центров люминесценции, связанных с Yb^{3+} , использовались либо легирование в процессе МЛЭ, либо ионная имплантация (в обоих случаях с дополнительной имплантацией кислорода и отжигом). В структурах, состоящих из последовательности квантовых ям различной толщины, специфические линии собственной люминесценции разных ям были использованы в качестве зондов для контроля пространственного распределения радиационных дефектов и определены режимы

Энергетические характеристики центров люминесценции Yb^{3+}

Центр	E_0 , эВ	$\delta = E_f - E_0$, мэВ	E_{ph} , эВ	$\hbar\omega_{ph}$, мэВ
X_1	1.2321	38.4	1.1615	70.6
X_2	1.2329	37.6	1.1634	69.5
Y_1/Y_2	1.2518	18.7	1.1849	66.7
S_1	1.2254	45.1	1.1347	90.7
Se_1	1.2321	38.4	1.1615	70.6
Te_1	1.2415	29.0	1.1848	56.7

Примечание. $E_f = 1.2705$ эВ — энергия перехода (${}^2F_{5/2} - {}^2F_{7/2}$) свободного иона Yb^{3+} , E_0 — энергия бесфононного перехода, E_{ph} — энергия перехода с участием фонона, $\hbar\omega_{ph} = E_0 - E_{ph}$ — энергия фонона.

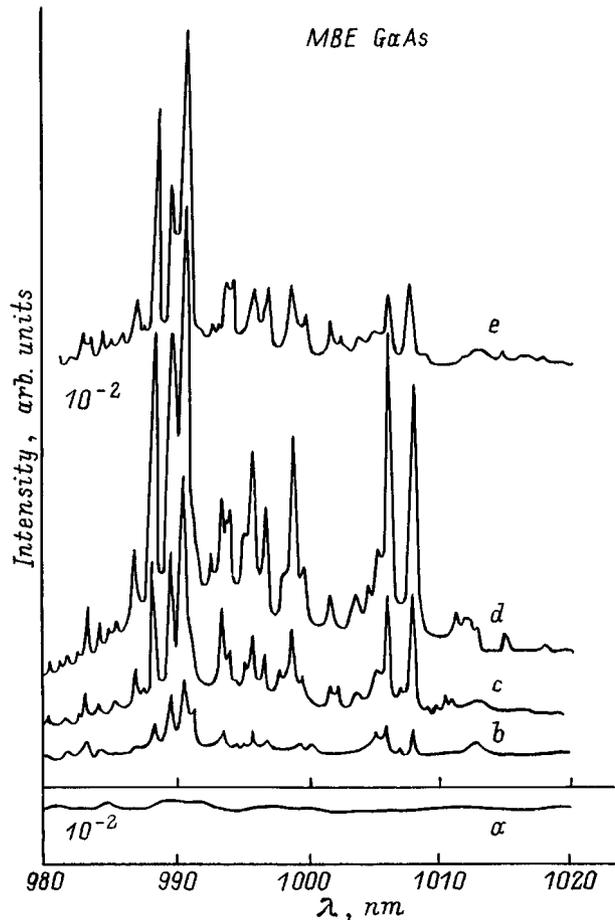


Рис. 2. Спектры люминесценции GaAs, легированного Yb в процессе МЛЭ (*a*) и дополнительно легированного кислородом методом имплантации (*b–e*). Концентрация Yb — 10^{18} см^{-3} . Концентрация кислорода: *b* — 10^{18} , *c* — $3 \cdot 10^{18}$, *d* — $6 \cdot 10^{18}$, *e* — 10^{19} см^{-3} . Температура отжига 700°C .

имплантации и отжига, обеспечивающие приемлемое качество структур после имплантации [5]. Согласно предварительным данным, интенсивность люминесценции (в расчете на единицу концентрации) центров на основе Yb^{3+} , находящихся в квантовой яме, более чем на порядок превышает таковую в объемном материале, по-видимому благодаря эффектам пространственного ограничения электронно-дырочных пар [6].

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (№ 96-02-18206), программы "Физика твердотельных наноструктур" (№ 97-1046), ИНТАС–РФФИ (№ 95-053) и CRDF (№ RE1-235).

Список литературы

- [1] A. Kozanecki, R. Gratzschel. *J. Appl. Phys.*, **68**, 517 (1990).
- [2] V.M. Konnov, T.V. Larikova, N.N. Loyko, V.A. Dravin, V.V. Ushakov, A.A. Gippius. *Sol. St. Commun.*, **96**, 839 (1995).

- [3] V.M. Konnov, T.V. Larikova, N.N. Loyko, V.A. Dravin, V.V. Ushakov, A.A. Gippius. *Mater. Res. Soc. Symp. Proc.*, **422**, 187 (1996).
- [4] A.A. Gippius, V.M. Konnov, N.N. Loyko, V.V. Ushakov, I.P. Kazakov, V.A. Dravin, N.N. Sobolev. *Mater. Sci. Forum*, **258–263**, 917 (1997).
- [5] Н.Н. Лойко, В.М. Коннов, Т.В. Ларикова. Кр. сообщ. по физике ФИАН, № 9–10, 48 (1996).
- [6] В.М. Коннов, В.А. Дравин, Н.Н. Лойко, И.П. Казаков, А.А. Гиппиус. Кр. сообщ. по физике ФИАН (в печати).

Редактор В.В. Чалдышев

Optical activation of Yb in GaAs and GaAs/GaAlAs low-dimensional structures

A.A. Gippius, V.M. Konnov, V.A. Dravin, N.N. Loyko, I.P. Kazakov, V.V. Ushakov

P.N. Lebedev Physical Institute,
117924 Moscow, Russia

Abstract It has been demonstrated that optical activation of Yb in GaAs and GaAs/GaAlAs low-dimensional structures can be realized by the formation of three-component ($\text{Yb} + \text{S/Se/Te} + \text{O}$), luminescence centers on the basis of an Yb^{3+} ion. The characteristics of these complexes were found to correlate with the parameters of the activators chalcogens. Oxygen was shown to participate in the energy transfer from electron-hole pairs to luminescence centers.