

чески активное состояние [4]. Таким образом, если действительно уменьшение N_O^{opt} и N_C^{opt} связано с образованием комплексов типа $Mn-O$ или $Mn-S$, то именно распад их может обеспечивать описываемые явления, причем чем больше N_O^{opt} в образце, тем больше образовалось при диффузии Mn комплексов типа $Mn-O$ и тем дольше идет их распад при НТО (см. рисунок).

Надо отметить, однако, что термообработка приводит к увеличению (возврату) оптически активного кислорода почти до исходной величины и не вызывает восстановления оптически активного углерода. По-видимому, комплекс типа $Mn-O$ является более термостабильным.

Методами рентгеновской топографии и электронной микроскопии обнаружена дополнительная фаза в этих образцах Si , которая при типичном режиме введения Mn представляет собой частицы неопределенной формы (размером $\sim 500 \text{ \AA}$), большой плотности ($\sim 10^{10} \text{ см}^{-3}$) [7].

Были проведены предварительные эксперименты по определению фазового состава этих частиц методом рентгеноструктурного анализа (ДРОН-1М). На дифрактограммах обнаружен пик, параметры которого по таблицам ASTM совпадают с силикатом марганца (предположительно $MnSiO_3$). Кроме того, в этих спектрах обнаружен пик, идентифицировать который пока не удалось, возможно, он связан с углеродными комплексами марганца.

Список литературы

- [1] Carlson O. R. // Phys. Rev. 1959. V. 104. N 4. P. 937—941.
- [2] Болтакс Б. И., Бахадырханов М. К., Городецкий С. М., Куликов Г. С. Компенсированный кремний. Л., 1972. 122 с.
- [3] Абдурахманов К. П., Лебедев А. А., Крейсль Й., Утамурадова Ш. Б. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 2. С. 213—216.
- [4] Абдурахманов К. П., Витман Р. Ф., Далиев Х. С., Лебедев А. А., Утамурадова Ш. Б. // ФТП. 1985. Т. 19. В. 6. С. 1158—1159.
- [5] Абдурахманов К. П., Лебедев А. А., Утамурадова Ш. Б. // Вестн. Каракалпакского филиала АН УзССР. 1985. № 4. С. 10—13.
- [6] Parkins W. E., Dienes G. I., Brown F. W. // J. Appl. Phys. 1951. V. 22. P. 1012—1018.
- [7] Витман Р. Ф., Гусева Н. Б., Лебедев А. А., Ситникова А. А., Утамурадова Ш. Б. // ЖТФ. 1988. Т. 58. В. 11. С. 2272—2274.

Физико-технический институт
им. А. Ф. Иоффе АН СССР
Ленинград

Получено 27.06.1989
Принято к печати 10.07.1989

ФТП, том 23, вып. 12, 1989

СВОЙСТВА СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ

$InP\langle Yb \rangle$ и $InP\langle Er \rangle$

Мастеров В. Ф., Савельев В. П., Штельмах К. Ф., Захаренков Л. Ф.

В литературе по $A^{III}B^V$, легированных редкоземельными элементами (РЗЭ), утвердилось мнение, что предельная концентрация атомов РЗЭ в этих полупроводниках не превышает 10^{17} см^{-3} . Это, безусловно, должно привести к ограничению возможных применений указанных материалов, в частности в качестве источников света на внутрицентровых $f-f$ -переходах.

В настоящей работе мы показываем, что в принципе концентрация атомов РЗЭ в фосфиде индия, занимающих узельные положения в решетке, составляет по крайней мере $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (и, возможно, это не является пределом), что позволяет вновь поставить вопрос о возможности создания на основе этого материала когерентных и некогерентных источников излучения в области длин волн $1 \div 1.5 \text{ мкм}$.

Исследовался материал, полученный при синтезе из раствора-расплава. Легирование осуществлялось в процессе роста. Максимальные концентрации и

атомов РЗЭ в позиции замещения индия с окружением, близким к кубическому, составляли $5 \cdot 10^{19}$ (Yb) и $1 \cdot 10^{18}$ см⁻³ (Er). Оценка концентрации ионов Yb³⁺ и Er³⁺ осуществлялась методом ЭПР. Спектры электронного парамагнитного резонанса приведены на рис. 1, а, б. Параметры спектров практически совпадают с опубликованными в [1, 2]. InP<Er> представлял собой крупноблочный образец (в [2] исследовался поликристалл), и в спектре ЭПР Er³⁺ наблюдались угловые зависимости *g*-фактора и ширины линии, но из-за наложения спектров от разных блоков уточнить параметры спин-гамильтониана не удалось. Можно утверждать, однако, что оба центра Yb³⁺ и Er³⁺ имеют симметрию, близкую к кубической. Ширина линии центрального перехода (*I*=0) не превышала в обоих случаях 12 Гс.

На образцах InP<Er> внутрицентровую люминесценцию зарегистрировать не удалось при температурах 6–300 К, хотя ранее она наблюдалась на ионно-

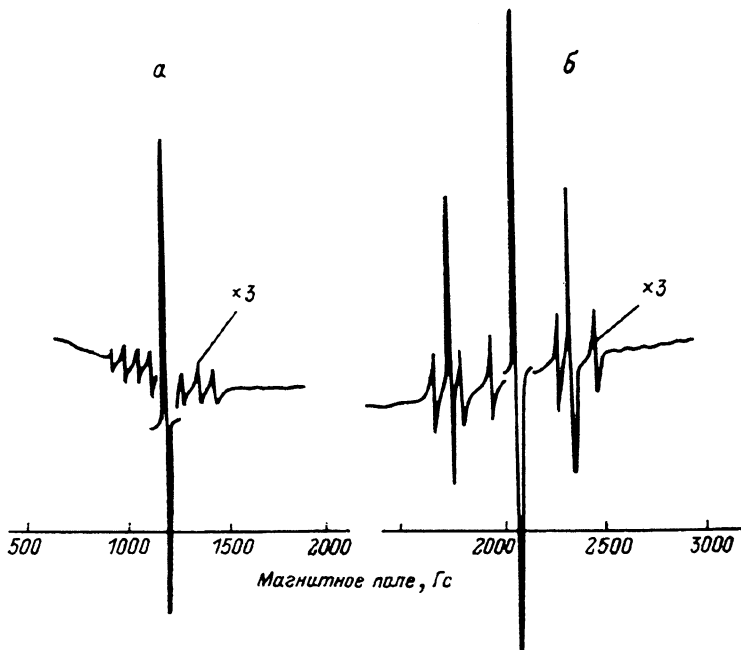


Рис. 1. Спектры ЭПР Er³⁺ (а) и Yb³⁺ (б) в фосфиде индия при 4 К.

имплантированных образцах InP, GaP, GaAs и Si, на GaAs, выращенном по методу Бриджмена, и в кремнии, полученном методом молекулярно-пучковой эпитаксии [3]. Вопрос об отсутствии люминесценции в наших образцах фосфида индия при наличии узельных центров Er³⁺, установленных методом ЭПР, остается открытым. Можно предположить, что это связано с особенностями механизма возбуждения внутрицентральной *f*–*f*-фотолюминесценции в полупроводниках при энергии возбуждающего кванта $\hbar\omega \geq E_g$, который до настоящего времени не разработан.

Напротив, в образцах InP<Yb> наблюдалась внутрицентровая люминесценция в области $\lambda \approx 1$ мкм как при 6, так и при 77 К, интенсивность которой значительно превышала «краевую» люминесценцию (рис. 2). Форма спектра фотолюминесценции полностью совпадает с наблюдаемой ранее, в частности, на ионно-имплантированных образцах [3]. Интенсивность *f*–*f*-люминесценции Yb³⁺ линейно возрастает с увеличением интенсивности возбуждающего света (см. вставку на рис. 2), т. е. даже при столь высоких концентрациях Yb³⁺ в кристаллах InP стимулированного излучения не наблюдается.

Таким образом, можно сформулировать основной результат, полученный в данной работе: предел растворимости атомов РЗЭ, в частности Yb, гораздо выше предлагаемого ранее и составляет не менее $5 \cdot 10^{19}$ см⁻³. При этом иттербий занимает узельные позиции в решетке фосфида индия и находится в состоянии

Yb^{3+} в кубическом окружении, что позволяет рекомендовать такой материал для создания полупроводниковых источников света с узкой полосой излучения в области 1 мкм.

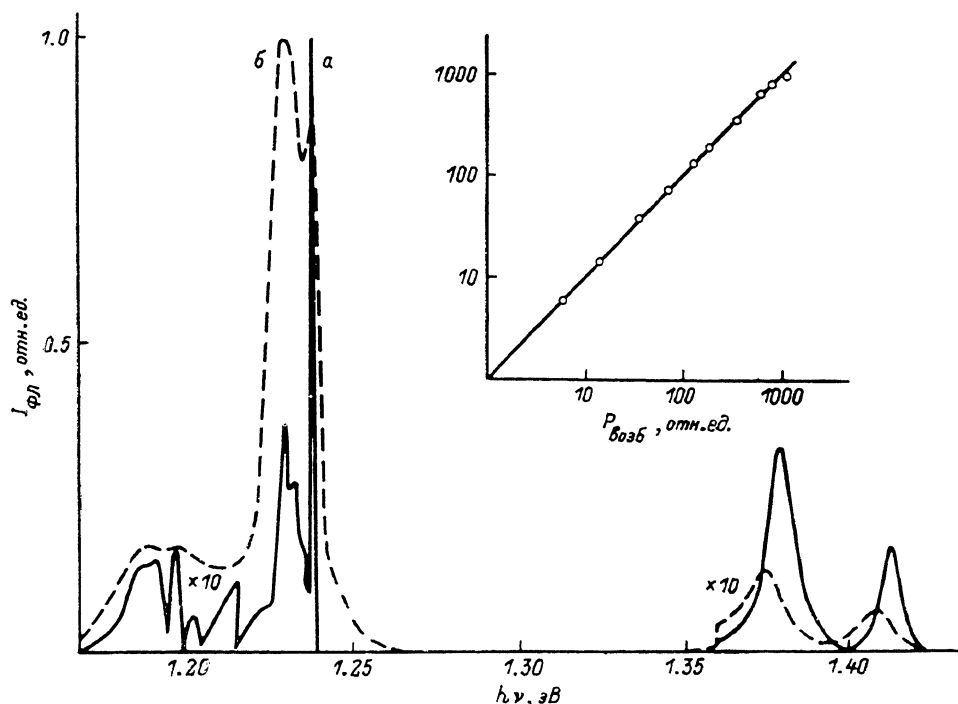


Рис. 2. Спектры фотолуминесценции монокристалла $\text{InP}\langle\text{Yb}\rangle$ при 6 (а) и 77 К (б).

$\lambda_{возб} = 0.5145$ мкм. На вставке — зависимость интенсивности внутрицентрального $f-f$ -перехода от интенсивности возбуждающего света.

В заключение отметим, что образцы фосфида индия с высокой концентрацией иттербия имели большое сопротивление. Возможной причиной этого является эффект рафинирования материала небольшой частью иттербия, не встроившегося в решетку InP .

Список литературы

- [1] Касаткин В. А., Мастеров В. Ф., Романов В. В. и др. // ФТП. 1982. Т. 16. В. 1. С. 173—175.
- [2] Мастеров В. Ф., Штельмах К. Ф., Захаренков Л. Ф. // ФТП. 1987. Т. 21. В. 2. С. 365—366.
- [3] Eppen H., Schneider I. // Proc. 13 Int. Conf. Def. Semicond. / Ed. by L. C. Kimerling, J. M. Parsey. Coronado, California, 1984. P. 115—127.

Ленинградский
политехнический институт
им. М. И. Калинина

Получено 9.07.1989
Принято к печати 14.07.1989