

пик ФЛ с максимумом при энергии 1.443 эВ, который, возможно, связан с акцепторным центром, возникающим при отжиге. С учетом величины E_g , равной 1.52 эВ ($T=4.2$ К), и в предположении обусловленности данной полосы переходами электронов из зоны проводимости на уровень дефекта акцепторного типа можно оценить энергию активации последнего. Полученное значение 77 мэВ совпадает с величиной первой энергии ионизации АСД Ga_{As} , найденной в [4].

На рис. 2 приведены спектры ФП отожженных образцов GaAs при температурах 80 и 300 К. Абсолютные максимумы спектров соответствуют, по-видимому, межзонным переходам. Что касается двух сравнительно узких пиков ФП с максимумами при энергиях 1.49 и 1.45 эВ, которые наблюдаются при 80 К, то первый из них может быть обусловлен примесными центрами C_{As} и (или) Si_{As} , а второй — АСД Ga_{As} . При комнатной температуре указанные особенности не разрешаются.

АСД Ga_{As} , согласно литературным данным, характеризуется двумя значениями энергии активации (77 и 230 мэВ), соответствующими отрыву дырок от центров Ga_{As}^0 и Ga_{As}^- [4]. Оценки показывают, что уровень Ферми в слоях p -типа, полученных отжигом кристаллов i -GaAs при 900 °С в течение 1 ч, располагается при низких температурах между двумя вышеупомянутыми уровнями АСД Ga_{As} . Следовательно, в равновесных условиях акцепторный уровень, лежащий на 77 мэВ выше потолка валентной зоны, заполнен электронами, а второй, более глубокий, пуст. Этим обстоятельством, на наш взгляд, и объясняется тот факт, что в спектрах ФП и ФЛ отожженных образцов наблюдаются полосы, связанные только с одним наиболее мелким уровнем АСД Ga_{As} .

Таким образом, дырочная проводимость, возникающая после отжига кристаллов i -GaAs в водороде, обусловлена, по-видимому, центрами Ga_{As} , ответственными за полосы ФЛ при 1.443 эВ (6 К) и ФП при 1.45 эВ (80 К).

Л и т е р а т у р а

- [1] Mircea-Roussel A., Gacob G., Hallais J. P. — In: Semi-Insul. III—V Mater. Conf. Nottingham, 1980, p. 133—137.
- [2] Look D. C., Pomrenke G. S. — J. Appl. Phys., 1983, v. 54, N 6, p. 3249—3254.
- [3] Hiramoto T., Mochizuki Ya., Saito T., Ikoma T. — Japan. J. Appl. Phys., 1985, v. 24, N 12, p. L921—L924.
- [4] Yu Ph. W., Mitchel W. C., Mier M. G., Li S. S., Wang W. L. — Appl. Phys. Lett., 1982, v. 41, N 6, p. 532—534.

Физический институт
и. П. Н. Лебедева АН СССР
Москва

Получено 28.10.1987
Принято к печати 15.12.1987

ФТП, том 22, вып. 6, 1988

ВЛИЯНИЕ ОТЖИГА НА РАССЕЯНИЕ СВЕТА ПРИМЕСНЫМИ СКОПЛЕНИЯМИ В ПОЛУИЗОЛИРУЮЩИХ КРИСТАЛЛАХ $InP : Fe$ и $GaAs : Cr$

Калинушкин В. П., Мурина Т. М., Тигиняну И. М.,
Юрьев В. А.

В работах [1-3] сообщалось об обнаружении в кристаллах InP и $GaAs$ с помощью метода малоуглового рассеяния света примесных скоплений с размером ~ 10 мкм.

Очевидно, что данные скопления, будучи центрами захвата и рассеяния носителей заряда, могут оказывать существенное влияние на работу приборных структур на базе кристаллов InP и $GaAs$. В данном сообщении с помощью ме-

тогда малоуглового рассеяния света с длиной волны $\lambda=10.6$ мкм проводится сравнительное исследование термостабильности полуизолирующих монокристаллов InP : Fe и GaAs : Cr, которые находят все более широкое применение в электронике СВЧ. Плотность дислокаций в монокристаллах обоих соединений не превышала $5 \cdot 10^4$ см⁻², удельное сопротивление составляло $10^6 \div 10^8$ Ом·см для InP : Fe и $10^8 \div 10^9$ Ом·см для GaAs : Cr ($T=300$ К).

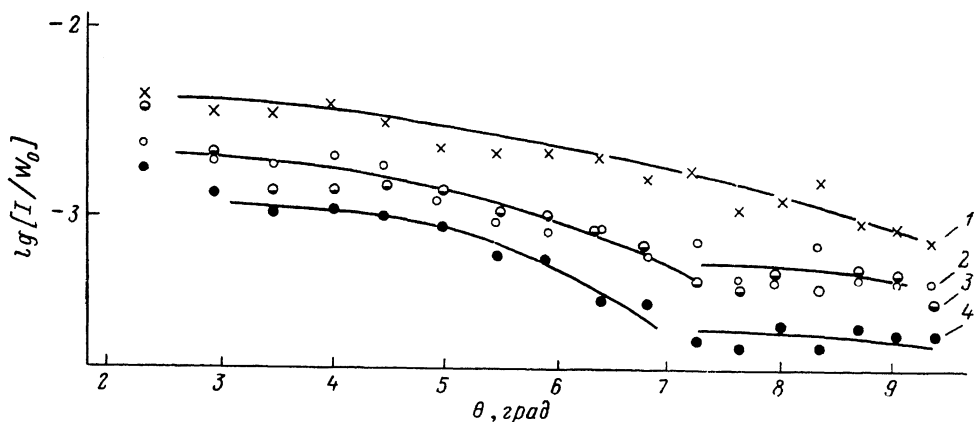


Рис. 1. Диаграммы рассеяния света кристаллами GaAs : Cr.

1 — 300 К до прогрета; 2 — 150 °С; 3 — 300 К сразу после остывания; 4 — 300 К через 3 ч после остывания.

Методика эксперимента и схема экспериментальной установки подробно описаны в [4, 5]. Измерения проводились следующим образом. Первоначально снималась диаграмма рассеяния образца при 300 К. Затем образец нагревался до определенной температуры $T \geq 150$ °С, причем в процессе нагрева снимались диаграммы рассеяния при различных T_0 . Скорость нагрева варьировалась

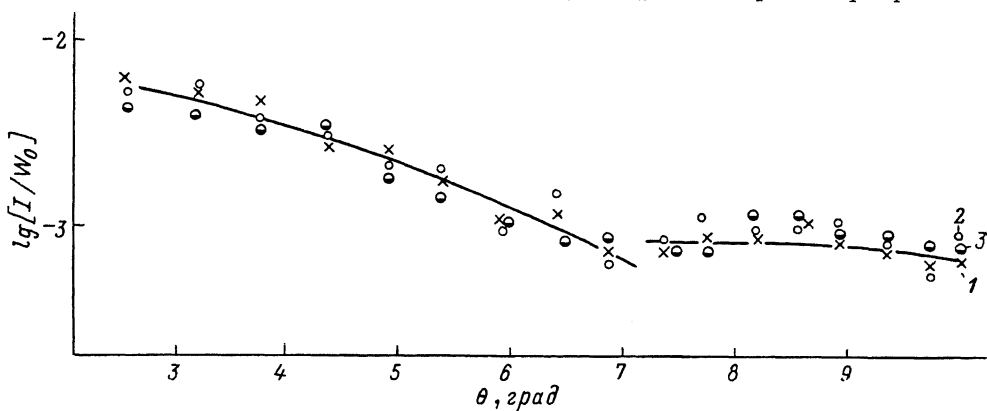


Рис. 2. Диаграммы рассеяния света кристаллами InP : Fe.

1 — 300 К до прогрета; 2 — 150 °С; 3 — 300 К после остывания.

от 3 до 30 К/мин. При температуре T_0 образец мог выдерживаться в течение нескольких часов, после чего он охлаждался со скоростью $3 \div 30$ К/мин до комнатной температуры, при которой опять снималась диаграмма рассеяния. В ряде случаев диаграммы рассеяния снимались и при промежуточных температурах. В используемой схеме эксперимента гарантировалось исследование одной и той же области кристалла при всех температурах.

Перейдем к краткому описанию экспериментальных результатов. На рис. 1 приведены диаграммы рассеяния монокристаллов GaAs : Cr до нагрева, при 150 °С, сразу после охлаждения до 300 К и через 3 ч выдержки при комнатной температуре. Видно, что интенсивность рассеяния при 150 °С существенно упала по сравнению с $I_{рас}$ при 300 К и не восстанавливалась при охлаждении

кристалла до комнатной температуры. Выдержка при 300 К в течение нескольких часов также не привела к восстановлению исходной диаграммы рассеяния.

Типичные диаграммы рассеяния монокристаллов InP : Fe до нагрева, при 150 °С и сразу после охлаждения до 300 К приведены на рис. 2. Анализ кри-вых показывает, что в кристаллах имеются рассеивающие скопления с диаметрами $a_1 \approx 16$ и $a_2 \approx 4$ мкм. Из рис. 2 видно, что отжиг не влияет на свойства примесных скоплений в InP : Fe. Этот результат характерен для всех исследуемых в данной работе кристаллов InP : Fe.

В работе [6] было показано, что основной вклад в рассеяние света с $\lambda = 10.6$ мкм дают свободные носители, находящиеся в области скоплений. В связи с этим можно сделать вывод, что имеющиеся в исследуемых в данной работе кристаллах InP и GaAs примесные скопления не содержат большого количества глубоких, неионизированных при комнатной температуре центров (в противном случае $I_{\text{нас}}$ должна была бы увеличиваться с ростом T , что не наблюдается экспериментально).

Таким образом, примесные скопления в полуизолирующих кристаллах InP : Fe стабильны по отношению к прогреву до температуры 150 °С. Что касается GaAs : Cr, то анализ показывает, что прогрев приводит к изменениям как размеров содержащихся в кристаллах скоплений, так и значений концентрации нескомпенсированных свободных носителей в скоплениях. Аналогичные результаты наблюдались при исследовании влияния низкотемпературного прогрева на рассеяние света кристаллами особо чистого германия [7].

Отметим, что более высокая стабильность фосфида индия и приборных структур на его основе по сравнению с арсенидом галлия отмечается и в ряде других работ. В частности, для гетеролазеров GaAs/GaAlAs характерно быстрое старение, что не имеет места для структур InP/InGaAsP [8-10]. Если же взять, к примеру, смешанные кристаллы InGaAs, то процесс старения светодиодов на их основе замедляется по мере увеличения доли индия [11].

В заключение авторы выражают благодарность Е. В. Руссу за предоставление монокристаллов фосфида индия.

Л и т е р а т у р а

- [1] Воронков В. В., Воронкова Г. И., Калинушкин В. П., Мурин Д. И., Омельяновский Э. М., Первова Е. А., Прохоров А. М., Райхштейн В. И. — ФТП, 1984, т. 18, в. 8, с. 1363—1367.
- [2] Георгбидани А. Н., Калинушкин В. П., Микуленок А. В., Мурин Д. И., Прохоров А. М., Радауцан С. И., Тигиняну И. М., Урсаки В. В. — ФТП, 1985, т. 19, в. 5, с. 810—813.
- [3] Kalinushkin V. P., Murin D. I., Omeljanovsky E. M., Polyakov A. I., Prohorov A. M., Raihstein V. I. — *Semicond. Sci. Techn.*, 1987, v. 2, p. 397—381.
- [4] Воронков В. В., Воронкова Г. И., Зубов Б. В., Калинушкин В. П., Крынецкий Б. Б., Мурина Т. М., Прохоров А. М. — ФТТ, 1981, т. 23, в. 1, с. 117—126.
- [5] Воронков В. В., Воронкова Г. И., Калинушкин В. П., Мурин Д. И., Прохоров А. М. — ФТП, 1984, т. 18, в. 5, с. 938—940.
- [6] Воронков В. В., Воронкова Г. И., Зубов Б. В., Крынецкий Б. Б., Мурина Т. М., Прохоров А. М. — ФТТ, 1977, т. 19, в. 6, с. 1784—1792.
- [7] Батурина А. В., Воронков В. В., Воронкова Г. И., Калинушкин В. П., Маненков А. А., Мурина Т. М., Прохорова А. М. — ФТТ, 1987, т. 29, в. 3, с. 728—733.
- [8] Horikoshi Y., Kobayashi T., Furukawa Y. — *Japan. J. Appl. Phys.*, 1979, v. 18, N 12, p. 2237—2240.
- [9] Ueda O., Yamakoshi S., Yamaoka T. — *Japan. J. Appl. Phys.*, 1980, v. 19, N 6, p. 1252—1255.
- [10] Ykoma T., Mochizuki Ya. — *Japan. J. Appl. Phys.*, 1985, v. 24, N 12, p. L935—L937.
- [11] Etterberg M., Nuese C. J. — *J. Appl. Phys.*, 1975, v. 46, N 11, p. 2137—2140.

Институт общей физики
АН СССР
Москва

Получено 11.11.1987
Принято к печати 17.12.1987