

УДК 621.315+535.37

## СПЕКТРЫ КОМБИНАЦИОННОГО РАССЕЯНИЯ СВЕТА В МОНОКРИСТАЛЛАХ $InP$ , РАЗУПОРЯДОЧЕННЫХ ИОННЫМ ВНЕДРЕНИЕМ $He^+$

А. Н. Георгобиани, З. П. Илюхина, А. В. Спицын,  
А. И. Терлецкий, В. В. Урсаки

*Изучено влияние имплантации ионов  $He^+$  и постимплантационного отжига на спектры комбинационного рассеяния света монокристаллов  $InP$  с ориентацией поверхности (100) и (111). Обнаружено, что имплантация ионов  $He^+$  с энергией 100 кэВ при дозах  $10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$  разрушает кристаллическую решетку вплоть до аморфизации, что приводит к несоблюдению правил отбора.*

Полупроводниковые соединения  $A^3B^5$  и, в частности,  $InP$ , являются перспективными материалами для изготовления приборов СВЧ диапазона и различных оптоэлектронных устройств. Комбинационное рассеяние света (КРС) может дать полезную информацию об особенностях кристаллической структуры, от монокристаллических образцов до сильно разупорядоченных. КРС использовалось для изучения различных беспорядочных структур в ионно-имплантированных полупроводниках  $A^3B^5$  [1, 2]. Было показано, что КРС является эффективным методом для количественного анализа не только степени разрушения, обусловленного ионной имплантацией [3], но и профиля разрушений по глубине имплантированного слоя. Тионг и др. [3] дали количественное объяснение сдвига и уширения линии оптического (LO) фонона в  $GaAs$ , имплантированном ионами  $As^+$ . Целью этой работы являлось изучение влияния имплантации ионов  $He^+$  в интервале доз  $10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$  на процессы разрушения кристаллической решетки в  $InP$  и ее восстановления в процессе постимплантационного отжига.

В работе использовались специально нелегированные объемные монокристаллы  $InP$ , выращенные по методу Чохральского с жидкостной герметизацией расплава, с концентрацией свободных электронов  $2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$  и подвижностью  $4000 \text{ см}^2/V \cdot \text{с}$  ( $T =$

300 K). После механической полировки и химического травления пластины  $InP$  с ориентацией поверхности (100) и (111) имплантировались при 300 K ионами  $He^+$  с энергией 100 кэВ при дозах  $1 \cdot 10^{13} - 10^{15} \text{ см}^{-2}$ . Постимплантационный отжиг проводился в атмосфере водорода в течение 15 мин при различных температурах в интервале 400 – 700°C; имплантированная поверхность пластины прикрывалась полированной пластиной  $InP$ . Регистрация спектров КРС производилась при комнатной температуре на спектрометре ДФС-52 в режиме счета квантов с разрешением не хуже  $1 \text{ см}^{-1}$ . В качестве источника возбуждения использовался твердотельный лазер ЛТН-402 с длиной волны 530 нм. При этой длине волны глубина проникновения света составляет примерно 0,1 мкм, что сравнимо с толщиной имплантированного слоя. Мощность лазерного излучения не превышала 200 мВт.

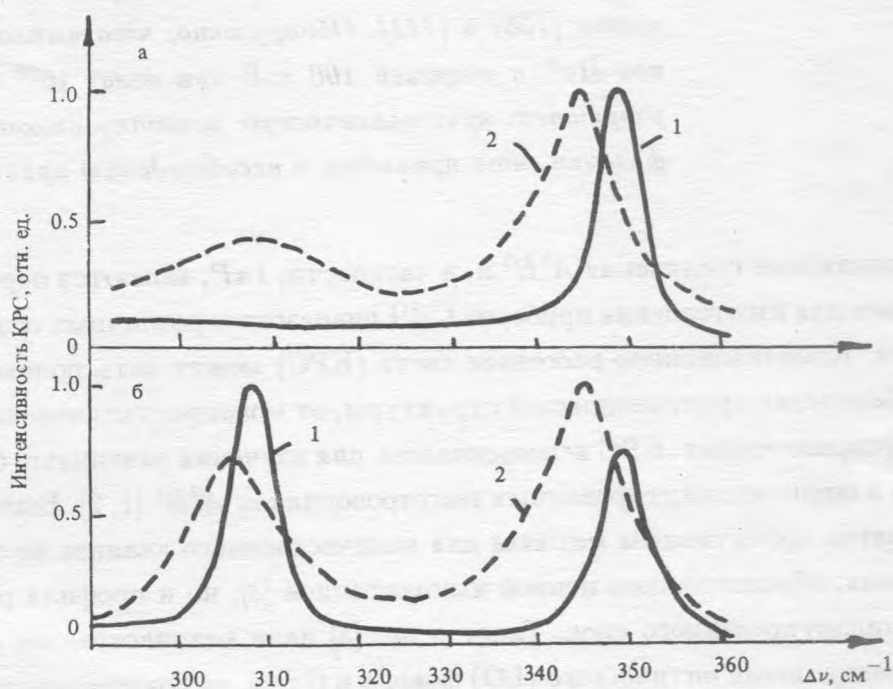


Рис. 1. Спектры КРС исходных (1) и имплантированных ионами  $He^+$  с дозой  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  (2) кристаллов  $InP$ . Кристаллографическая ориентация поверхности: а – (100); б – (111).

На рис. 1а показаны спектры КРС для исходных (сплошная кривая) и имплантированных ионами  $He^+$  при дозе  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  кристаллов  $InP$  с ориентацией поверхности

(100) (пунктирная кривая). Аналогичные спектры для ориентации поверхности (111) показаны на рис. 16. Как видно из этих рисунков, для исходных кристаллов  $InP$  с ориентацией поверхности (100) наблюдается только один LO фонов при  $349 \text{ см}^{-1}$ . В то же время, для кристаллов с ориентацией (111) характерен как LO ( $349 \text{ см}^{-1}$ ), так и TO ( $308 \text{ см}^{-1}$ ) фонов. Как известно [4], правилами отбора для кристаллов со структурой цинковой обманки для поверхности (100) разрешено рассеяние только на частоте LO колебаний решетки, а для поверхности (111) – на частоте обоих оптических фононов. Имплантация ионов  $He^+$  с дозой  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  приводит к появлению в спектре КРС кристаллов с ориентацией (100) запрещенного правилами отбора TO фона (рис. 1а). Для ориентации (111) после имплантации происходит только небольшое перераспределение интенсивностей линий LO и TO фононов. Такое поведение спектров КРС, очевидно, связано со структурным разупорядочением в имплантированном слое, приводящим к снятию "запрета", накладываемого правилами отбора.

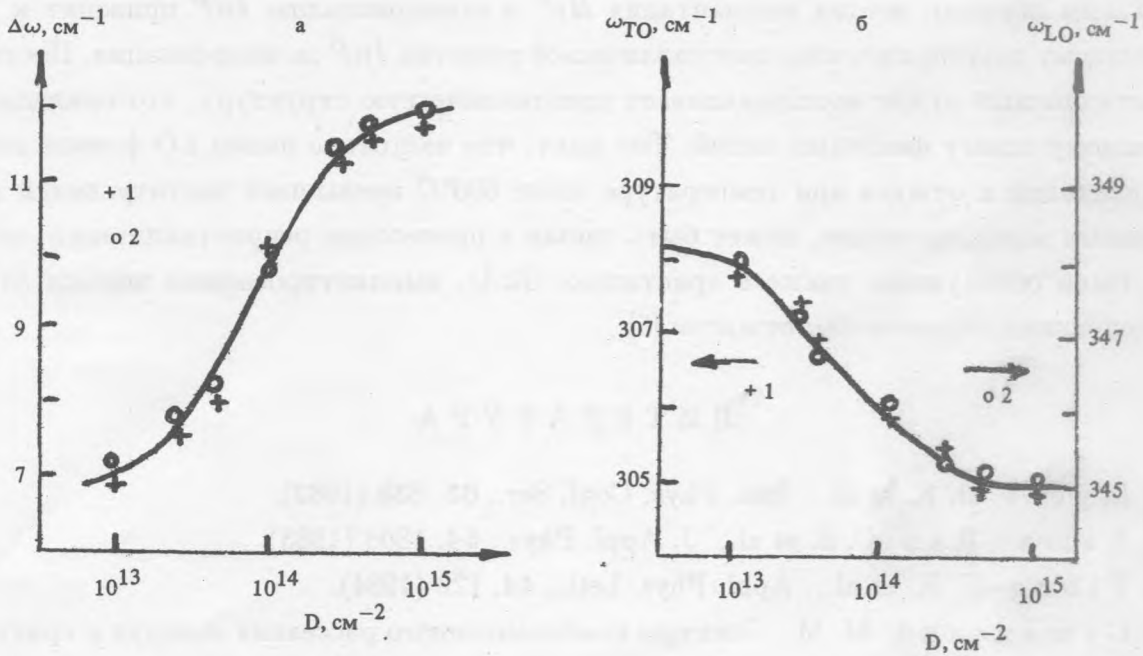


Рис. 2. Зависимость полуширины  $\Delta\omega$  (а) и частоты  $\omega$  (б) линий КРС от дозы имплантации  $D$  для TO (1) и LO (2) фононов.

Кроме указанных изменений в спектрах КРС, имплантация ионов  $He^+$  приводит к уширению линий LO и TO фононов и их сдвигу в область низких энергий. На рис. 2 показаны зависимости максимумов полос (б), соответствующих TO (1) и LO (2) фононам, а также их полуширины (а) от дозы имплантированных ионов  $He^+$ . Общей особенностью этих зависимостей является постепенное изменение параметров полос КРС в интервале доз имплантации  $10^{13} - 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ . При дальнейшем увеличении дозы имплантации параметры линий КРС практически не меняются. Такие зависимости параметров полос КРС объясняются нарушением трансляционной симметрии, вызванным разупорядочением структуры кристалла, которое приводит к тому, что все фононы в зоне Бриллюэна (и не только с волновым вектором  $q = 0$ ) участвуют в комбинационном рассеянии первого порядка.

Нами обнаружено, что для дозы имплантации  $10^{15} \text{ см}^{-2}$  при последующем отжиге образцов происходит постепенный сдвиг линии LO фонона в область высоких энергий, причем при температурах отжига выше  $600^\circ\text{C}$  частота линии  $\omega$  превосходит аналогичную частоту для неимплантированного кристалла.

Таким образом, ионная имплантация  $He^+$  в монокристаллы  $InP$  приводит к постепенному разупорядочению кристаллической решетки  $InP$  до аморфизации. Постимплантационный отжиг восстанавливает кристаллическую структуру, что приводит к обратному сдвигу фононных линий. Тот факт, что частота  $\omega$  линии LO фонона после имплантации и отжига при температуре выше  $600^\circ\text{C}$  превышает частоту линии для исходных монокристаллов, может быть связан с процессами рекристаллизации, которые были обнаружены также в кристаллах  $GaAs$ , имплантированных ионами  $Si^+$  с последующим термическим отжигом [5].

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Myers D. K. et al., Inst. Phys. Conf. Ser., **65**, 635 (1982).
- [2] Rama Rao C. S. et al., J. Appl. Phys., **54**, 1808 (1983).
- [3] Tiong K. K. et al., Appl. Phys. Lett., **44**, 122 (1984).
- [4] Сущинский М. М. Спектры комбинационного рассеяния молекул и кристаллов. М., 1969.
- [5] Guangming Xiao et al., J. Appl. Phys., **71** (10), 4843 (1992).

Поступила в редакцию 28 декабря 1993 г.