

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ И ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ ФОСФОРА
НА ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЕ СВОЙСТВА InP

А. Н. Георгобьяни, А. В. Микуленок, Е. И. Панасяк,
И. М. Тигичяну

УДК 535.37

В области 0,9–1,3 эВ обнаружены три полосы фотолюминесценции InP при энергиях 1,03, 1,08 и 1,21 эВ ($T=6$ К), интенсивность которых зависит от условий обработки образцов. Установлено, что полоса при 1,08 эВ связана с недостатком фосфора, а две другие полосы – с избытком фосфора в кристаллах.

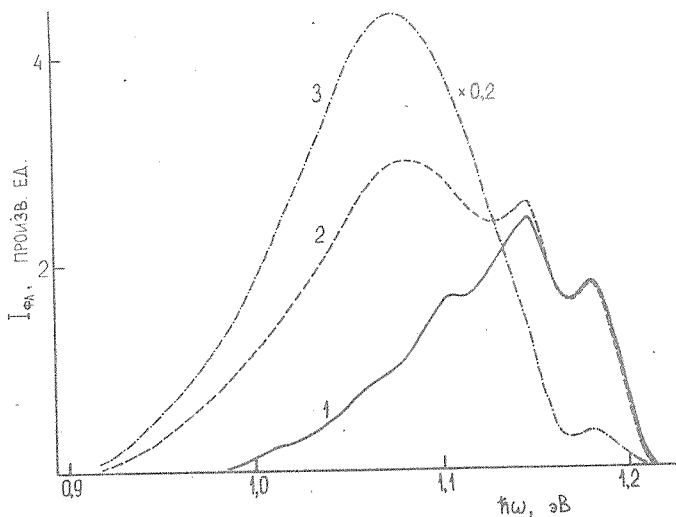
Вблизи края собственного поглощения фосфида индия ($E_g = 1,423$ эВ при $T = 4,2$ К /1/) наблюдается ряд полос фотолюминесценции (ФЛ), связанных с экситонными комплексами /2,3/ или донорно-акцепторными парами /4/. Помимо краевой люминесценции в кристаллах InP обнаружена широкая полоса ФЛ вблизи $\sim 1,1$ эВ, которая связывается как с посторонними примесями /5/, так и с вакансиями фосфора /6,7/. Установлено также, что обработка кристаллов в парах фосфора приводит к появлению в спектре ФЛ InP полосы при 1,21 эВ, обусловленной по мнению авторов работы /8/ собственными дефектами соединения (вакансиями индия или междуузельными атомами фосфора). С целью уточнения природы центров, ответственных за полосы ФЛ при $\sim 1,1$ и 1,21 эВ, нами были исследованы спектры ФЛ исходных, отожженных в разных условиях и облученных ионами фосфора монокристаллов фосфида индия.

Исследованные кристаллы фосфида индия получены из расплава под давлением инертного газа. Тип проводимости кристаллов – электронный. Концентрация электронов $n = 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ при $T = 300$ К. Отжиг кристаллов осуществлялся в парах фосфора (рас-

четное давление $p = 5-6$ атм) или в атмосфере водорода при 750°C . Ионы фосфора внедрялись при дозе 10^{15} см^{-2} на ускорителе тяжелых ионов фирмы High Voltage Engineering Europa. Энергия ионов составляла 270 кэВ. После имплантации образцы InP отжигались при температурах 550°C и 750°C в парах фосфора. Длительность отжига во всех случаях составляла 15 мин.

Возбуждение ФЛ осуществлялось излучением гелий-неонового лазера с длиной волны $\lambda = 6328 \text{ \AA}$. В качестве спектрального прибора использовался монохроматор SPM-2, спектральное разрешение было не хуже $0,01$ эВ. Приемником излучения служило охлаждаемое фотосопротивление PbS. Исследуемые кристаллы находились при температуре 6 К.

В исходных образцах InP в области $\sim 1,1$ эВ наблюдается полоса ФЛ с фоновой структурой (рис. 1 кривая 1). Анализ формы кривой ФЛ указывает на то, что в формировании данной полосы участвует продольный оптический фонон InP ($\hbar\omega_{LO} = 42,8$ мэВ /II/)



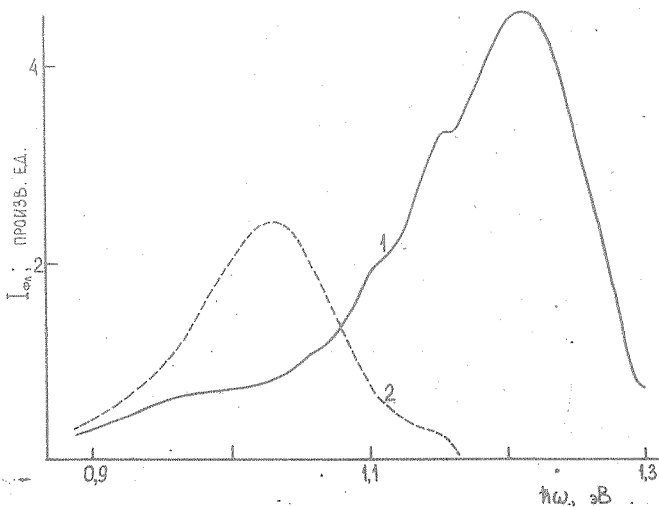
Р и с. 1. Спектры ФЛ исходных монокристаллов InP (1) и образцов, отожженных при 750°C в парах фосфора (2) и в атмосфере водорода (3)

Отметим, что впервое полоса ФЛ с фоновой структурой в области $\sim 1,1$ эВ была обнаружена в работе /9/ и связывалась с присутствием в кристаллах примеси железа.

После отжига образцов происходят существенные изменения в спектрах ФЛ (рис. 1, кривая 2,3). Анализ приведенных кривых показывает, что спектр ФЛ отожженных образцов сложный и состоит, по крайней мере, из двух элементарных полос с максимумами при 1,14 эВ и 1,08 эВ. Нами установлено, что с увеличением температуры отжига от 550 °С до 750 °С интенсивность полосы ФЛ при 1,08 эВ возрастает.

Кроме того, интенсивность этой полосы сильно зависит от той атмосферы, в которой отжигаются кристаллы. Из рис. 1 видно, что после отжига в атмосфере водорода (кривая 3) полоса 1,08 эВ приблизительно на порядок интенсивнее, чем после отжига кристаллов в парах фосфора (2).

Известно, что фосфор является более летучим компонентом кристаллов InP. С учетом этого можно предположить, что полоса



Р и с. 2. Спектры ФЛ кристаллов InP после облучения ионами и отжига в парах фосфора: $T_{\text{отж}} = 550$ °С (1), $T_{\text{отж}} = 750$ °С (2)

ФЛ при 1,08 эВ, появляющаяся после отжига образцов, связана с вакансиями фосфора V_P . Появление данной полосы после отжига в парах фосфора можно объяснить тем, что пары фосфора при использованных температурах отжига состоят из молекул $P_4/10$, которые слабо взаимодействуют с кристаллом.

Ионная имплантация фосфора в InP приводит к появлению новых полос ФЛ (рис. 2). После отжига образцов при температуре 550 °С в спектре ФЛ преобладает одна широкая полоса с максимумом при 1,21 эВ (кривая 1). Отжиг при температуре 750 °С приводит к исчезновению в спектре ФЛ этой полосы и к появлению новой полосы ФЛ с максимумом при 1,03 эВ (2).

Указанные полосы ФЛ связаны, по-видимому, с избытком фосфора в кристаллах, причем, на наш взгляд, наиболее вероятными дефектами в этом случае являются междуузельные атомы P_i и вакансия индия V_{In} . Если учесть, что с увеличением температуры отжига образцов концентрация междуузельного фосфора должна уменьшаться, то полосу ФЛ при 1,21 эВ можно связать с дефектом P_i , а полосу ФЛ при 1,03 эВ — с дефектом V_{In} .

Таким образом, отклонение состава кристаллов InP от стехиометрического приводит к появлению в спектре ФЛ полос при энергиях 1,08, 1,21 и 1,03 эВ, причем полоса ФЛ при 1,08 эВ связана с недостатком фосфора, а две другие полосы — с его избытком. Вопрос о природе центра, ответственного за полосу ФЛ с фоновой структурой при 1,14 эВ остается открытым и требует дальнейших исследований.

В заключение авторы выражают благодарность В. Н. Равичу за предоставление монокристаллов фосфида индия, И. Г. Стояновой и А. Л. Чапкевичу за интерес к работе и проведение имплантации ионов фосфора и В. В. Урсаки за помощь в проведении экспериментов.

Поступила в редакцию
7 июля 1982 г.

Л и т е р а т у р а

1. S. B. Nam et al., Phys. Rev., B12, 1643 (1976).
2. O. Röder, U. Heim, M. H. Pilkuhn, J. Phys. Chem. Sol., 31, 2625 (1970).

3. D. C. Reynolds et al., Phys. Rev., B13, 2507 (1976).
4. U. Heim, Sol. St. Commun., 7, 445 (1969).
5. L. A. Demberel et al., Phys. Stat. Sol. (a), 52, 341 (1979).
6. J. B. Mullin et al., J. Cryst. Growth, 13/14, 640 (1972).
7. Y. Yoshimitsu et al., Jap. J. Appl. Phys., 20, 347 (1981).
8. H. Temkin, B. V. Dutt, W. A. Bonner, Appl. Phys. Lett., 38,
431 (1981).
9. Phil Won Yu, Sol. St. Commun., 34, 183 (1980).
10. J. R. Van Wazer, Phosphorus and Its Compounds, v. 1, 2, In-
tersci. Publ., Inc., N.-Y., 1958.
11. C. Hilsum, S. Fray, C. Smith, Sol. St. Commun., 7, 1057 (1969).