

## ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ МАРГАНЦА НА СПЕКТР ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ GaSb

Георгицэ Е. И., Гуцудяк Л. М., Иванов-Омский В. И.,  
Мастеров В. Ф., Смирнов В. А., Юлдашев Ш. У.

Приведены результаты исследования влияния марганца на спектр фотолюминесценции антимонида галлия. Исследовавшиеся образцы обладали *p*-типом проводимости, концентрация свободных дырок изменялась при 77 К в пределах  $1.5 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Наблюдаемое сужение запрещенной зоны GaSb с увеличением содержания марганца объясняется учетом преимущественного вклада обменного взаимодействия дырок и их взаимодействием с примесным потенциалом.

Показано, что с увеличением содержания марганца происходит уширение основной полосы краевой люминесценции, обусловленное размытием краев зон. Температурный ход полуширины полосы излучения использован для определения концентрации примесей и степени их компенсации.

*Введение.* Поведение марганца в соединениях  $A^{III}B^V$  достаточно широко освещено в литературе [1-5], в то время как антимонид галлия изучен слабо.

В настоящей работе приведены результаты исследования влияния концентрации марганца на форму спектра фотолюминесценции антимонида галлия.

### Экспериментальные результаты и их обсуждение

Исследовавшиеся образцы представляли собой объемные монокристаллы, выращенные методом зонной плавки, *p*-типа проводимости. Легирующая примесь — марганец — вводилась в шихту в концентрациях 0.005—1 ат%. Концентрация дырок при 77 К изменялась в пределах  $1.5 \cdot 10^{16} \div 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ .

Фотолюминесценция исследовалась по стандартной методике. Неравновесные носители возбуждались твердотельным лазером Nd : YAG ( $\lambda \sim 1.06 \text{ мкм}$ ), мощность которого при работе в непрерывном одномодовом режиме составляла  $\sim 0.5 \text{ Вт}$ , что соответствует слабому уровню возбуждения.

На рис. 1 представлены спектры фотолюминесценции антимонида галлия с различной концентрацией легирующей примеси. Как видно, спектры ФЛ состоят из двух полос излучения, условно обозначенных *A* и *B*. Максимумы этих полос для образца с 0.005 ат% марганца соответствуют энергиям 775 и 797 мэВ. В спектрах ФЛ при 77 К выделяются следующие особенности: с увеличением содержания марганца растет полуширина полосы *B*, она смещается при этом в длинноволновую область спектра, уменьшается интенсивность полосы *A*, исчезая при 1 % Mn, без смещения максимума. Обращает на себя внимание то, что энергетическое положение максимума полосы *B* для образца с 0.005 % Mn практически совпадает с шириной запрещенной зоны нелегированного антимонида галлия. Сравнение с литературными данными позволяет предположить, что полоса *A* обусловлена переходами зона проводимости—природный акцептор, а полоса *B*, скорее всего, связана с переходами зона проводимости—валентная зона, как следует из факта совпадения ее максимума в наименее легированном Mn образце с величиной запрещенной зоны в нелегированном антимониде галлия.

Смещение максимума полосы излучения *B*, приписываемого нами межзонной рекомбинации, в длинноволновую область спектра с увеличением содержа-

бия марганца может происходить из-за концентрации зонного сужения запрещенной зоны легированного полупроводника, которое обусловлено несколькими факторами: взаимодействием носителей с примесным потенциалом [6, 7], обменным взаимодействием свободных носителей [8], а также изменением постоянной решетки [9]. Вследствие достаточно малого количества введенного марганца  $\sim 1\%$  последний фактор, очевидно, не будет давать большого вклада в наблюдаемое изменение ширины запрещенной зоны. Следовательно, наблюдаемое в эксперименте изменение ширины запрещенной зоны естественно связать с обменным взаимодействием свободных носителей и их взаимодействием с примесями. Этот вывод согласуется с данными работы [7].

На рис. 2 приведены результаты изменения ширины запрещенной зоны антимионида галлия с увеличением уровня легирования и теоретический расчет поправки к величине запрещенной зоны  $|\Delta E_g|$  с учетом обменного взаимодействия дырок. Расчет выполнен в соответствии с данными работы [10], в которой дополнительно учитывается взаимодействие дырок с примесным потенциалом. На основании удовлетворительного согласия расчета с экспериментом

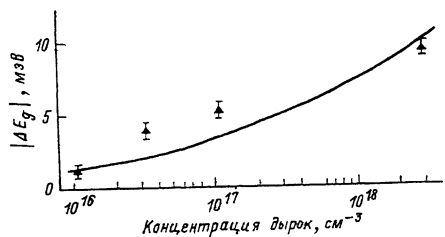
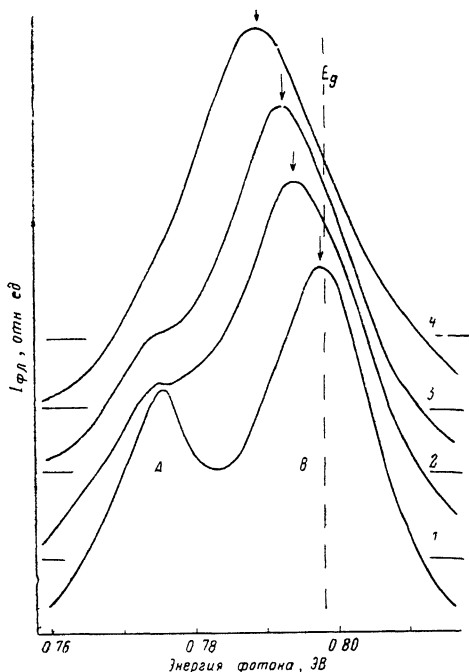


Рис. 1. Спектры фотолюминесценции GaSb : Mn при 77 К.  
Содержание Mn, ат%: 1 — 0.005, 2 — 0.01, 3 — 0.1, 4 — 1.

Рис. 2. Изменение ширины запрещенной зоны антимионида галлия от концентрации свободных дырок.  
Точки — эксперимент для образцов с различным содержанием марганца, сплошная линия — расчет в соответствии с работой [10].

можно сделать вывод, что названные выше механизмы вносят преимущественный вклад в сужение запрещенной зоны.

На рис. 3 представлена зависимость полуширины полосы  $B$  от концентрации примеси. Видно, что с увеличением концентрации марганца полуширина этой полосы растет. Расчет изменения ширины полосы  $B$  с учетом размытия краев зоны, обусловленный флуктуациями плотности заряженной примеси, выполнялся в соответствии с работой [11]. Расчет, как видно, качественно правильно описывает наблюдаемое в эксперименте уширение данной полосы излучения.

На рис. 4, а представлено температурное смещение полосы  $B$  для двух образцов с различными концентрациями марганца. Видно, что в интервале температур  $2 \div 50$  К происходит смещение максимума этой полосы в коротковолновую область спектра и при  $T=40$  К достигает  $\sim 6$  мэВ. Столь значительное температурное смещение не может найти объяснения в рамках модели Иггса [12], описывающей зависимость излучательного перехода зона проводимости—акцептор от температуры. Смещение в коротковолновую область спектра намного превосходит предсказываемую данной моделью величину смещения  $\sim k_B T/2$ . Объяснение наблюдаемых изменений можно найти в теории люминесценции сильно легированных полупроводников [13]. При температурах выше

60 К полосу  $B$  смещается в длинноволновую область спектра со скоростью, совпадающей с температурным ходом ширины запрещенной зоны.

Температурная зависимость полуширины полосы  $B$  для образца GaSb : 0.01 % Mn представлена на рис. 4, б. Видно, что присутствуют два участка с постоянными полуширинами: низкотемпературный ( $2 \div 25$  К) со значением полуширины  $\Delta_0$  и высокотемпературный с полушириной  $\Delta_\infty$ , в то время как в температурном интервале  $30 \div 50$  К происходит достаточно резкое увеличение полуширины полосы  $B$ . Наблюдаемый характер изменения полуширины полосы  $B$  с температурой может быть связан с переходом от коррелированного

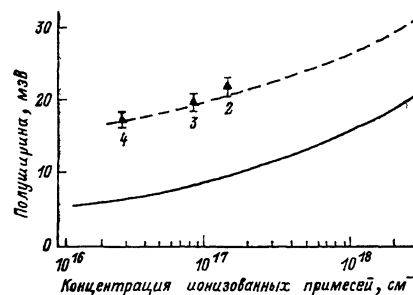


Рис. 3. Зависимость полуширины полосы излучения от концентрации примесей при 77 К.

Точки — эксперимент, сплошная линия — расчет по формулам работы [11]. Содержание Mn, ат%: 1 — 1, 2 — 0.1, 3 — 0.01, 4 — 0.005.

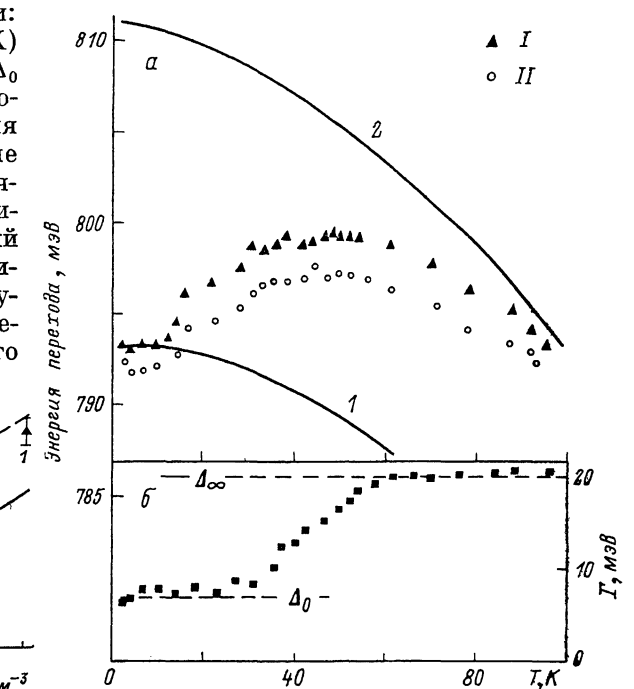


Рис. 4. Температурное смещение полосы излучения  $B$  (зона проводимости—акцептор) (а); зависимость полуширины полосы  $B$  от температуры для образца, содержащего 0.01 % Mn (б).

I — GaSb: 0.005 % Mn, II — GaSb: 0.01 % Mn. 1 — расчет [12]; 2 — расчет температурного смещения запрещенной зоны [1\*]. Полуширина излучательной полосы при температурах:  $\Delta_0$  — низких,  $\Delta_\infty$  — высоких.

распределения носителей заряда по примесям к хаотическому. Следуя разработанной в работе [14] процедуре описания такого перехода, можно определить концентрацию примесей и степень их компенсации. Оценка концентрации примесей в исследованных образцах GaSb : 0.01 % Mn и GaSb : 0.005 % Mn дает соответственно  $9.5 \cdot 10^{16}$  и  $3.5 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup>.

Степень компенсации равняется 0.3 и 0.2 соответственно. Сравнение сделанных оценок с результатами холловских измерений дает для величины ( $N_A - N_D$ ) соответственно значения  $9.3 \cdot 10^{16}$  и  $3.16 \cdot 10^{16}$  см<sup>-3</sup> и указывает на разумное их согласие между собой.

### Список литературы

- [1] Мастеров В. Ф. // ФТП. 1984. Т. 18. В. 1. С. 3—23.
- [2] Мастеров В. Ф., Саморуков Б. Е. // ФТП. 1978. Т. 12. В. 4. С. 625—652.
- [3] Омеляновский Э. М., Фистуль В. И. Примеси переходных металлов в полупроводниках. М., 1983. 191 с.
- [4] Милнс А. Примеси с глубокими уровнями в полупроводниках. М., 1977. 437 с.
- [5] Фистуль В. И. Физика и материаловедение полупроводников с глубокими уровнями. М., 1987. 232 с.
- [6] Hass C. // Phys. Rev. 1962. V. 125. P. 1965—1971.
- [7] Auvergne D., Camassel J., Mathieu H. // Phys. Rev. B. 1975. V. 11. N 1. P. 2251—2259.
- [8] Wolf P. A. // Phys. Rev. 1962. V. 126. P. 405—410.
- [9] Фистуль В. И. Сильно легированные полупроводники. М., 1967. 323 с.
- [10] Hwang C. J. // Phys. Rev. B. 1970. V. 10. N 2. P. 4417—4425.

- [11] Шкловский Б. И., Эфрос А. Л. Электронные свойства легированных полупроводников. М., 1979. 416 с.
- [12] Eagles J. // J. Phys. Chem. Sol. 1960. V. 16. N 1. P. 76—80.
- [13] Леванюк А. П., Осипов В. В. // УФН. 1981. Т. 133. В. 3. С. 427—477.
- [14] Барановский С. Д., Гельмонт Б. Л., Голубев В. Г., Иванов-Омский В. И., Осутин А. В. // Письма ЖЭТФ. 1987. Т. 46. В. 10. С. 405—407.
- [15] Chidley E. T., Haywood S. K., Henriques A. B., Mason N. J., Nicholas R. J., Walker P. J. // Semicond. Sci. Techn. 1991. V. 6. N 1. P. 45—54.

Физико-технический институт  
им. А. Ф. Иоффе АН СССР  
Санкт-Петербург

Получена 24.06.1991  
Принята к печати 8.07.1991

