

## ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ СИЛЬНО ЛЕГИРОВАННОГО АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ ПРИ УПОРЯДОЧЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ПРИМЕСНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Богданова В. А., Семиколенова Н. А.

Приведены результаты исследования изменения спектров фотолюминесценции (ФЛ) в области красной и примесной излучательной рекомбинации в GaAs (Te) с увеличением уровня легирования от  $n = 10^{17}$  до  $n = 10^{19}$  см<sup>-3</sup>. При концентрациях свободных носителей  $n = (3+4) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> обнаружено существенное возрастание интенсивности краевой ФЛ, которое связывается с образованием примесной сверхструктуры. В области концентраций  $n = (1+3) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> происходит смена состава доминирующих сложных центров рекомбинации, при  $n > 3 \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> доминируют центры, ответственные за полосу ФЛ с  $h\nu_{\max} = 1.33 \pm 1.4$  эВ, не связанные с медью. Определена энергия ионизации основного состояния этого центра ( $0.14 \pm 0.19$  эВ).

*Введение.* В кристаллах арсенида галлия, выращенных методом Чохральского, при концентрации донорной примеси  $n \geq 10^{18}$  см<sup>-3</sup> обнаружено аномальное изменение механизмов рассеяния свободных носителей заряда, плазмон-фононного взаимодействия, термодинамических и структурных параметров [1]. Эффекты, не соответствующие традиционным представлениям о зависимости фундаментальных свойств полупроводников от уровня легирования, обусловлены процессами упорядочения сложных дефектов в примесной подрешетке. Проблема идентификации дефектов в GaAs сложна, прямые методы исследования структуры сложных примесных комплексов отсутствуют. В связи с этим особый интерес представляет систематическое исследование изменения параметров излучательной рекомбинации через глубокие уровни примесных комплексов с увеличением степени легирования на серии образцов, выращенных по единой технологии.

### Экспериментальные результаты

В работе исследовались спектры фотолюминесценции (ФЛ) при температуре жидкого азота на образцах арсенида галлия, легированного теллуrom, с концентрацией свободных носителей заряда  $n = 10^{17} \div 10^{19}$  см<sup>-3</sup> в области краевой и примесной излучательной рекомбинации. Результаты исследования краевой полосы ФЛ при различных уровнях легирования представлены на рис. 1. Интенсивность краевой ФЛ возрастает при увеличении концентрации носителей от  $10^{17}$  до  $10^{18}$  см<sup>-3</sup>, достигает максимума при  $n \sim 10^{18}$  см<sup>-3</sup>, затем быстро уменьшается. При дальнейшем росте уровня легирования при концентрации свободных носителей  $n = (3+4) \cdot 10^{18}$  см<sup>-3</sup> интенсивность краевой ФЛ вновь возрастает: более чем на порядок при 77 и на  $\sim 2$  порядка при 4.5 К. Зависимость интенсивности краевой ФЛ от концентрации свободных носителей заряда при температуре 77 К приведена на рис. 1.

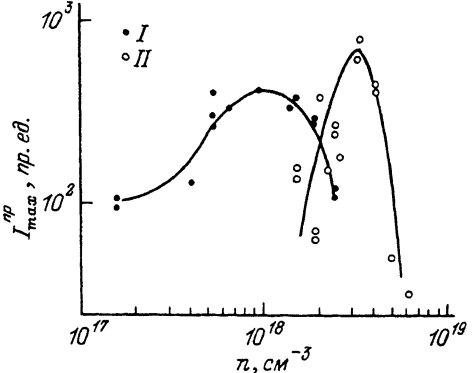
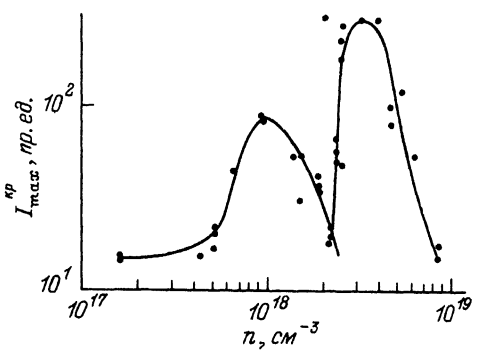


Рис. 1. Зависимость интенсивности краевой ФЛ от концентрации свободных носителей.

Рис. 2. Зависимость интенсивности примесных полос ФЛ I и II от концентрации свободных носителей.

Исследование примесной излучательной рекомбинации показало, что при концентрациях  $n = (2 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  происходит изменение состава доминирующих сложных рекомбинационных центров. В области концентраций  $n = 10^{17} \div 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  наблюдается широкая примесная полоса ФЛ с энергией максимума  $h\nu_{\text{max}} = 1.21 \div 1.22 \text{ эВ}$  (полоса I). Интенсивность этой полосы ФЛ растет с увеличением концентрации свободных носителей, проходит через максимум при  $n \sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , затем резко падает (рис. 2). При  $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  наряду с примесной полосой ФЛ (I) появляется полоса с энергией максимума  $h\nu_{\text{max}} = 1.33 \div 1.4 \text{ эВ}$  (полоса II). Максимальная интенсивность этой полосы ФЛ наблюдается при концентрации  $n \sim 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Спектральное положение максимума интенсивности полосы ФЛ (I) слабо меняется при изменении концентрации свободных носителей (рис. 3, а) и не зависит от температуры в области  $100 \div 230 \text{ К}$ . Энергия спектрального максимума полосы II возрастает с увеличением концентрации свободных носителей. На рис. 3, а показана также концентрационная зависимость энергии уровня Ферми, вычисленная с учетом электрон-электронного и электрон-примесного взаимодействия. Можно видеть, что характер зависимостей энергии спектрального максимума  $h\nu_{\text{max}}$  примесной полосы ФЛ (II) и энергии уровня Ферми от концентрации носителей заряда одинаков. При возрастании температуры энергия  $h\nu_{\text{max}}$  полос ФЛ (II) уменьшается так же, как ширина запрещенной зоны.

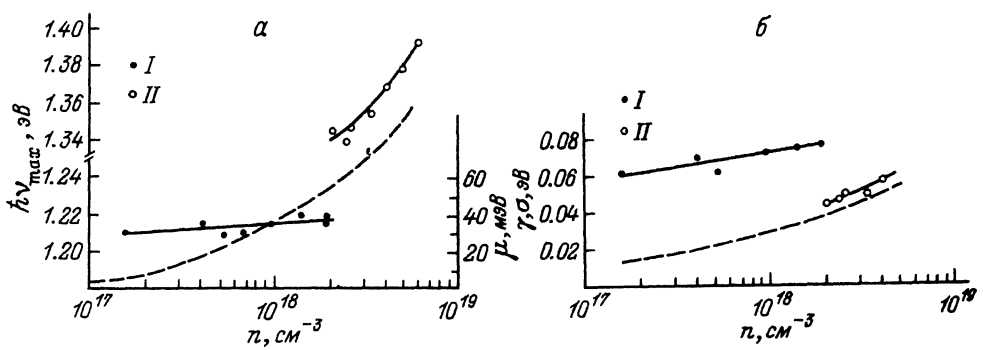


Рис. 3.

а — зависимость энергий спектрального максимума примесных полос ФЛ I и II и энергии Ферми (штриховая кривая) от концентрации свободных носителей; б — зависимость характерных энергий  $\sigma$  спада ФЛ полос I и II, теоретических значений  $\gamma$  (штриховая кривая) от концентрации свободных носителей.

На рис. 3, б представлена зависимость параметра  $\sigma$ , характерной величиной спада интенсивности ФЛ полос I и II в коротковолновую область, полученной из аппроксимации формы полос гауссовской кривой.

### Обсуждение экспериментальных результатов

Изменение интенсивности излучательной рекомбинации в области края с увеличением уровня легирования при  $n = 10^{17} + 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  соответствует общепринятым представлениям. В условиях, когда полное время жизни неосновных носителей заряда  $\tau_n$  контролируется безызлучательным временем жизни  $\tau_6$ ,  $I_{\text{кр}} \sim n\tau_6$ . В GaAs (Te)  $\tau \approx \tau_6$  и постоянно до  $n = 8 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  (77 К), и излучательная рекомбинация начинает конкурировать с безызлучательными процессами только в узкой области концентраций:  $8 \cdot 10^{17} < n < 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . При  $n > 2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  наблюдается быстрое уменьшение  $\tau_n$ , которое связывается с появлением дополнительных каналов безызлучательной рекомбинации [2]. Возрастание интенсивности краевой ФЛ при концентрациях свободных носителей  $n = (3 \div 4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  можно объяснить увеличением времени жизни неосновных носителей заряда.

При концентрациях свободных носителей  $(2 \div 3) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  происходит изменение состава доминирующих сложных рекомбинационных центров. Примесной полосе ФЛ с энергией максимума  $h\nu_{\text{max}} \sim 1.2 \text{ эВ}$  в GaAs (Te) посвящено много исследований начиная с работы [3]. Считается установленным в настоящее время, что за эту полосу ФЛ отвечает комплекс  $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ . Люминесценция появляется в результате электронных переходов внутри центра (модель Препера—Вильямса) и удовлетворительно описывается моделью конфигурационных координат. Однако, как отмечалось в [3], непонятным в рамках этой модели остается поведение пика полосы при изменении температуры в области 100—230 К.

Полоса ФЛ с энергией максимума  $h\nu_{\text{max}} \sim 1.35 \text{ эВ}$  в GaAs (Te), не связанная с медью, напротив, мало изучена. В литературе имеются данные лишь о том, что появление этой полосы в GaAs (Te) «стимулируется наличием вакансий мышьяка  $V_{\text{As}}$ » [4].

Изменение положения пика полосы ФЛ (II) с температурой само по себе не может еще служить доказательством модели рекомбинации зона проводимости—примесный уровень (модель Шена—Клазенца) [3]. Концентрационная зависимость пика этой полосы, повторяющая концентрационную зависимость уровня Ферми (рис. 3, а), является аргументом в пользу этой рекомбинационной схемы. Кроме этого, согласно теории примесной излучательной рекомбинации сильно легированных полупроводников [5], полуширина спектральной линии излучения определяется величиной  $\gamma$ , где  $\gamma$  — характерная величина флуктуации примесного потенциала, при  $\gamma > kT$ . Изменение величин характерных энергий спада примесной полосы ФЛ (II)  $\sigma$  ( $\sigma = \gamma\sqrt{2}$ ) с ростом концентрации качественно согласуется с изменением теоретических значений  $\gamma$ .

Исследование температурного гашения интенсивности полос ФЛ I и II дало приблизительно одинаковые величины энергии тепловой дезактивации люминесценции в высокотемпературной области  $\Delta E$ :  $\Delta E = 0.14 \div 0.2 \text{ эВ}$  для полосы I и  $\Delta E = 0.14 \div 0.19 \text{ эВ}$  для полосы ФЛ (II). В случае внутрицентровых переходов нет однозначного толкования смысла величин  $\Delta E$  [3, 6]. В случае модели Шена—Клазенца  $\Delta E$  характеризует энергию ионизации основного состояния сложного центра рекомбинации.

Для определения симметрии центра, отвечающего за полосу ФЛ (II), был применен метод поляризационных диаграмм, который ранее успешно использовался для исследования симметрии центра, ответственного за полосу ФЛ (I) [7]. Авторами был сделан вывод о моноклинности центра ( $V_{\text{Ga}}\text{Te}_{\text{As}}$ ).

Проведены измерения степени поляризации  $\Delta\rho = \rho(0^\circ) - \rho(90^\circ)$  полосы ФЛ ( $I_L$ ) в ортогональной схеме измерений для ориентаций кристалла (110)—(001), где первой указана грань, на которую падает возбуждающий свет, второй — грань, с которой ведется наблюдение при резонансном возбуждении центра. Степень поляризации оказалась равной нулю, что говорит о том, что центр обладает либо триклинной симметрией, либо кубической ( $T_d$ ). К сожалению, отсутствие достаточного количества надежных экспериментальных и теоретических данных не дает возможности построения какой-либо адекватной модели этого центра.

Как отмечалось выше, в области концентраций свободных носителей  $n = (3 \div 4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ , где доминируют сложные рекомбинационные центры, ответственные за полосу ФЛ ( $I_L$ ), наблюдается аномальное возрастание интенсивности краевой ФЛ. Предполагается, что это вызвано увеличением времени жизни неосновных носителей заряда вследствие перехода полупроводниковой системы из состояния со статистическим распределением сложных примесных комплексов в состояние с упорядоченным распределением. Образование примесной сверхструктуры при данных концентрациях свободных носителей заряда в GaAs (Te) подтверждается прямым электронно-графическим методом [1,8].

Таким образом, обнаружено существенное возрастание интенсивности краевой ФЛ при концентрациях свободных носителей  $n = (3 \div 4) \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$  (назовем их критическими), которое связывается с образованием примесной сверхструктуры. Показано, что при предкритических концентрациях происходит смена состава доминирующих рекомбинационных центров. При критических концентрациях доминируют центры, ответственные за полосу ФЛ с энергией максимума  $h\nu_{\text{max}} = 1.35 \div 1.4$  эВ. Энергия ионизации основного состояния данного центра равна  $0.14 \div 0.19$  эВ. Предварительное исследование симметрии показало, что центр имеет либо триклинную, либо кубическую ( $T_d$ ) симметрию.

Авторы признательны А. А. Гуткину и М. А. Решикову за проведение измерений степени поляризации люминесценции.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Семиколенова Н. А., Люзе Л. Л., Богданов В. А., Семиколенов А. С. // Тез. докл. XII Европ. конф. по кристаллографии. М., 1988. С. 118.
- [2] Hwang C. J. // J. Appl. Phys. 1971. V. 42. N 11. P. 4408.
- [3] Williams E. W. // Phys. Rev. 1968. V. 168. N 3. P. 922—928.
- [4] Камалов М. И., Колесник Л. И., Мильвидский М. Г., Шершакова И. Н. // ФТП. 1980. Т. 14. В. 1. С. 159—163.
- [5] Леванюк А. П., Осипов В. В. // ФТП. 1973. Т. 7. В. 8. С. 1575.
- [6] Феофилов П. П., Каплянский А. А. // УФН. 1956. Т. 58. В. 1. С. 69—84.
- [7] Аверкиев И. С., Гуткин А. А., Осипов Е. Б., Решиков М. А. и др. // ФТП. 1991. Т. 25. В. 1. С. 58—66.
- [8] Semikolenova N. A., Bogdanova V. A., Semikolenov A. S. // Phys. St. Sol. (a). 1990. V. 120. P. 121—123.