ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ КРИСТАЛЛОВ InP⟨Sn⟩

Н. Г. Джумамухамбетов, А. Г. Дмитриев

Санкт-Петербургский государственный технический университет,
195251, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 23.06.1992. Принята к печати 4.11.1992)

Изучена температурная зависимость в интервале 77—300 K спектров фотолюминесценции модифицированных лазерным излучением кристаллов InP⟨Sn⟩. Установлено, что полоса с максимумом на 1.35 эВ, возникшая в модифицированных кристаллах, обусловлена излучательной рекомбинацией через хвосты плотности состояний, которые появляются в результате хаотического распределения дефектов и примесей после лазерного воздействия.

Как известно [1, 2], обработка полупроводниковых соединений $A^{III}B^{V}$ импульсами лазерного излучения позволяет модифицировать приповерхностные слои кристаллов и открывает возможности для изучения их новых свойств.

Данная работа посвящена изучению фотолюминесцентных свойств кристаллов фосфида индия в интервале температур 77—300 K до и после модификации лазерным облучением. Изучались кристаллы, легированные оловом, с концентрацией электронов $\sim 2 \cdot 10^{18}$ см$^{-3}$. Методика лазерной обработки описана в работе [3]. Непосредственно перед измерениями кристаллы травились в свежеприготовленном полирующем травителе $H_2O : HNO_3 : HCl$ (6 : 3 : 1) при комнатной температуре.

В спектрах фотолюминесценции исходных кристаллов при 77 K обнаруживается лишь одна полоса с максимумом интенсивности излучения (I) на энергии 1.415 эВ и полушириной 0.06 эВ (рис. 1). Известно, что эта краевая полоса связана с излучательными переходами зона—акцепторный уровень [4]. При комнатной температуре также наблюдается одна полоса с полушириной 0.07 эВ и максимумом при энергии 1.347 эВ, что близко к энергии, соответствующей переходам зона—зона.

В результате воздействия серией лазерных импульсов с суммарной плотностью энергии $\simeq$100 Дж/см^2 происходит наблюдаемое визуально изменение морфологии полированной поверхности кристаллов в виде «оплавления». При этом в спектрах фотолюминесценции при 77 K появляется новая широкая полоса с максимумом около 1.350 эВ. Однако интенсивность излучения в максимуме этой полосы много меньше по сравнению с краевой полосой исходного кристалла.

После обработки кристаллов серией импульсов с суммарной плотностью энергии 250—300 Дж/см^2 интенсивность полосы 1.350 эВ увеличивается и при 77 K превосходит интенсивность краевой полосы исходного кристалла в 2—3 раза (рис. 1). При повышении температуры интегральная интенсивность полосы уменьшается (рис. 2) и ее можно аппроксимировать экспонентой вида

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-kT/\varepsilon^*),$$

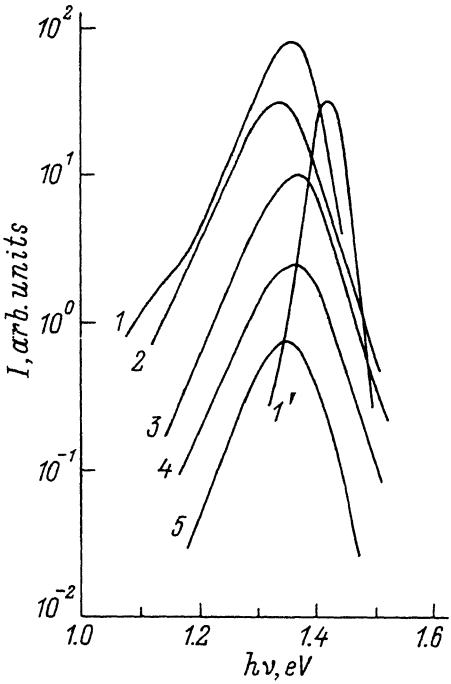

Рис. 1. Спектры фотолюминесценции кристаллов InP⟨Sn⟩ исходного (*1'*) и после импульсного лазерного облучения (*1—5*). *T*, K: *1*, *1'* — 77; *2* — 140; *3* — 200; *4* — 250; *5* — 300.

где ε^* — характеристическая энергия, которая оказалась равной 3.6 мэВ. При комнатной температуре, как и в исходных кристаллах, наблюдается относительно широкая полоса с максимумом на 1.347 эВ.

Энергетическое положение максимума полосы излучения $h\nu_m$ модифицированных кристаллов в интервале 77—300 K изменяется немонотонно (рис. 3). В области низких температур ($T < 130$ K) энергия $h\nu_m$ уменьшается с ростом температуры по линейному закону с температурным коэффициентом $\alpha_1 = 3.7 \cdot 10^{-4}$ эВ/K, что больше температурного коэффициента ширины запрещенной зоны E_g ($\alpha = 3.6 \times \times 10^{-4}$ эВ/K). В интервале температур $140 \leq T \leq 220$ K энергия $h\nu_m$ увеличивается с ростом температуры и может быть аппроксимирована выражением

$$h\nu_m = E_g - \alpha_2 T^{-2}$$

с температурным коэффициентом $\alpha_2 = 1.6 \cdot 10^3$ эВ/K. В области температур $T \gtrsim 220$ K энергия, соответствующая положению максимума в спектре, уменьшается линейно с температурным коэффициентом, равным температурному коэффициенту ширины запрещенной зоны.

Полуширина полосы δ в интервале температур 77—300 K изменяется также немонотонно (рис. 4). В интервале 77—230 K она линейно увеличивается с температурным коэффициентом $0.21 \cdot 10^{-3}$ эВ/K, а при $T > 230$ K уменьшается.

Если сравнить полученные температурные зависимости $h\nu_m$, δ и Φ с соответствующими зависимостями для арсенида галлия [5], то обнаруживается не только их функциональное сходство, но и близость значений соответствующих коэффициентов. Анализ, проведенный в [5], позволяет считать, что люминесценция модифицированных лазерным излучением кристаллов арсенида галлия обусловлена излучательными переходами через хвосты плотности состояний, возникшие в результате хаотического распределения дефектов и примесей при лазерной обработке. Учитывая сходство температурных зависимостей основных параметров люминесценции модифицированных кристаллов фосфида индия и арсенида галлия, есть основания полагать, что люминесценция модифицированных кристаллов InP⟨Sn⟩ в области температур $T < 220$ K также обусловлена переходами через хвосты плотности состояний, возникшие при лазерной обработке. В области высоких температур $T > 220$ K основным каналом рекомбинации, как и у исходных кристаллов, являются межзонные переходы.

Отметим, что близость значений параметров спектров фотолюминесценции модифицированного InP и модифицированного GaAs, по-видимому, не случайна, так как при воздействии импульсами миллисекундной длительности и тот и другой разлагаются в твердой фазе [2] (при температурах ниже температуры плавления), образуя в приповерхностной области слои нестехиометрического

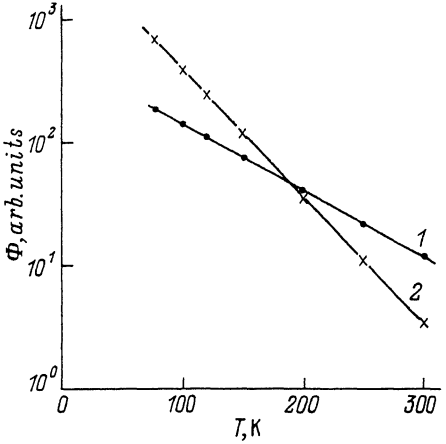

Рис. 2. Температурные зависимости интегральной интенсивности фотолюминесценции. *1* — исходный кристалл; *2* — кристалл после импульсного лазерного облучения.

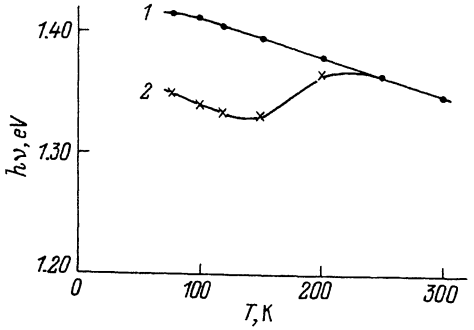

Рис. 3. Температурные зависимости положения максимума полосы в спектре фотолюминесценции. *1* — исходный кристалл; *2* — кристалл после импульсного лазерного облучения.

состава, люминесцентные свойства которых, как показывает эксперимент, сходны и определяются хаотическим распределением примесей и дефектов, что и приводит к образованию хвостов плотности состояний.

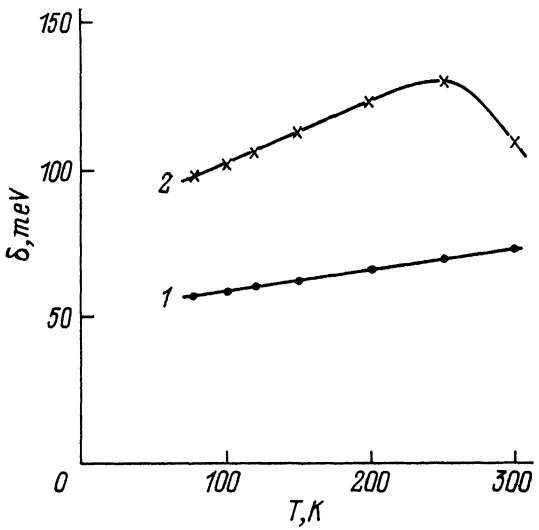

Рис. 4. Температурные зависимости полуширины полосы фотолюминесценции. *1* — исходный кристалл; *2* — кристалл после импульсного лазерного облучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] К. К. Джаманбалин, А. Г. Дмитриев, Э. Н. Сокол-Номоконов. Физ. и хим. обраб. материалов, вып. 3, 85 (1990).

[2] К. К. Джаманбалин, А. Г. Дмитриев, Э. Н. Сокол-Номоконов, Ю. И. Уханов. Физ. и хим. обраб. материалов, вып. 2, 20 (1990).

[3] Н. Г. Джумамухамбетов, А. Г. Дмитриев. ФТП, 22, 1880 (1988).

[4] Л. И. Колесник, А. М. Лощинский, А. Я. Нашельский, С. В. Якобсон. Изв. АН СССР. Неорг. матер., **17**, 38 (1981).
[5] Н. Г. Джумамухамбетов, А. Г. Дмитриев. ФТП, **25**, 93 (1991).

Редактор Л. В. Шаронова