

Оптические исследования квантовых точек InP

© Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, Д.Н. Николаев, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 18 июля 2000 г. Принята к печати 26 июля 2000 г.)

Представлены результаты фотолюминесцентных исследований самоорганизующихся наноразмерных кластеров (квантовых точек) InP в матрице $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$, выращенных на подложке GaAs методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений. Получены зависимости эффективности люминесценции от температуры в интервале 77–300 К и от уровня возбуждения при мощности накачки 0.01–5 кВт/см². Спектры фотолюминесценции являются суперпозицией излучения квантовых точек и смачивающего слоя. Соотношение их интенсивности зависит от мощности накачки и температуры, а длина волны излучения структуры изменяется в пределах 0.65–0.73 мкм. При низком уровне возбуждения и 77 К квантовые точки InP имеют высокую температурную стабильность длины волны излучения и высокую квантовую эффективность.

В последнее время интенсивно исследуются фундаментальные физические свойства нуль-мерных объектов. К таким объектам, в частности, относятся самоорганизующиеся квантовые точки (QD) — наноразмерные структуры, возникающие при гетероэпитаксиальном выращивании полупроводников с большим рассогласованием параметров кристаллической решетки [1]. На квантовых точках In(Ga)As в матрице GaAs уже получены эффективные фотоприемники [2] и гетеролазеры [3,4] с пороговой плотностью тока порядка 35 А/см² [4]. Большой практический интерес представляют наноструктуры с квантовыми точками InP, на основе которых возможно создавать наиболее коротковолновые лазерные структуры, излучающие в красном диапазоне длин волн. Основной технологический метод получения квантовых точек — молекулярно-лучевая эпитаксия (МВЕ), который, однако, имеет большие сложности при работе с фосфором. Квантовые точки InP могут воспроизводимо выращиваться только методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений (МОСVD), хотя в работе [5] сообщается о создании лазеров с квантовыми точками InP, полученными методом МВЕ. Эти лазеры работают только в импульсном режиме генерации при температуре, не превышающей 90 К.

В настоящей работе представлены результаты фотолюминесцентных (ФЛ) исследований гетероструктур с квантовыми точками InP, выращенными в матрице $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ на подложках GaAs. Исследования проводились в широком диапазоне температур (77–300 К) и при различных уровнях накачки. Массивы напряженных QD были получены методом газофазной эпитаксии из металлорганических соединений [6,7] в изотипных гетероструктурах при температуре 700°C. Слой с QD был заключен между буферным слоем $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ толщиной 0.35 мкм, согласованным по параметру решетки с подложкой GaAs ориентации (100), и верхним широкозонным слоем $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ толщиной 0.04 мкм. Номинальная толщина слоя с InP QD варьировалась от 0.5 до 12 монослоев (ML). Рост структур происходил в режиме Странского–Крастанова, который присущ системам с большим рассогласованием постоянных решетки (a) (на границе $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ и InP $\Delta a/a = 3.7\%$). В этом режи-

ме на поверхности широкозонной матрицы $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$ сначала реализуется послойный рост 1–3 ML InP так называемого смачивающего слоя (WL), а затем начинается образование трехмерных QD InP.

Возбуждение исследуемых образцов осуществлялось Ag^+ -лазером с длиной волны излучения 0.514 мкм. Плотность возбуждающего излучения изменялась в пределах 0.01–5 кВт/см². Сигнал от гетероструктуры регистрировался фотозлектронным умножителем с максимальной спектральной чувствительностью в диапазоне длин волн 0.35–0.9 мкм.

В полученных спектрах ФЛ наблюдался интенсивный пик, соответствующий излучению InP QD. При 77 К и мощности накачки 50 Вт/см² этот пик имел максимум при энергии 1.72 эВ, полуширину 50 мэВ и на 2 порядка превосходил излучение матрицы. Проведенные ранее исследования [7] показали, что полученные QD InP являются однородными и когерентными (бездислокационными) наноразмерными объектами, поскольку энергия максимума пика ФЛ QD остается практически неизменной при осаждении 2–7 ML InP. Максимальная внешняя квантовая эффективность ФЛ составляет 30% при 77 К у структур с номинальной толщиной 6 ML InP.

На рис. 1 приведены экспериментальные температурные зависимости максимума пика ФЛ QD номинальной толщины 5 ML, InGaP-матрицы при низком уровне возбуждения (50 Вт/см²), а также расчетные значения температурной зависимости энергии основных переходов сильно напряженной квантовой ямы (QW) InP толщиной 6 ML (1 ML = 2.9 Å), попадающие в один диапазон энергий с QD InP. Температурная зависимость длины волны излучения матрицы повторяет температурное сужение запрещенной зоны InGaP. Наиболее слабую температурную зависимость длины волны излучения в интервале температур 77–300 К имеют QD InP.

На рис. 2 приведены спектры ФЛ структур с QD InP при номинальной толщине осажденного слоя InP 3 ML (сплошные кривые) и 5 ML (штриховые кривые) при 77 К и различных уровнях возбуждения в интервале 0.01–3.5 кВт/см². Эти пики являются суперпозицией двух пиков излучения — QD и смачивающего слоя. При

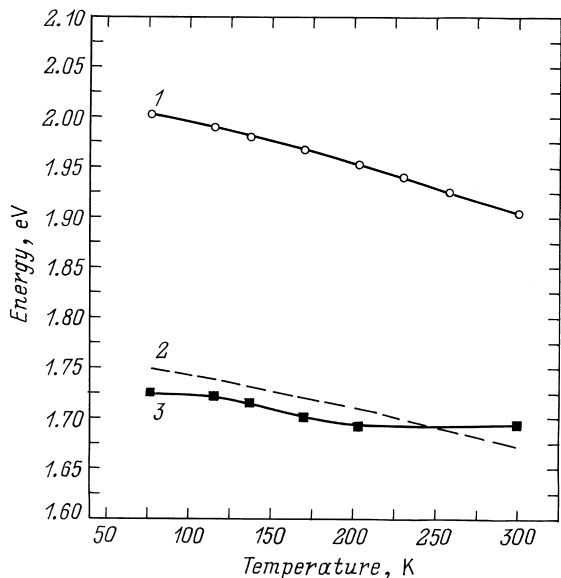


Рис. 1. Экспериментальные температурные зависимости максимума пика фотолюминесценции при уровне возбуждения 50 Вт/см^2 : 1 — матрица $\text{In}_{0.49}\text{Ga}_{0.51}\text{P}$; 3 — квантовые точки InP (номинальная толщина осажденного слоя 5 ML); 2 — расчетные значения для сильно напряженной квантовой ямы InP толщиной 6 ML.

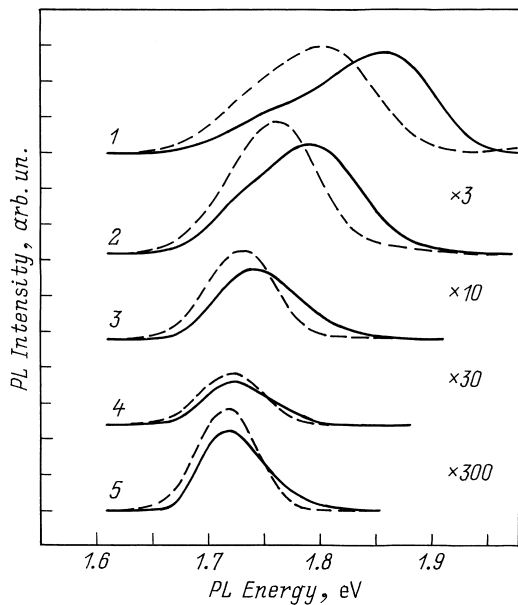


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции структур с квантовыми точками InP при номинальной толщине осажденного слоя 3 ML (сплошные кривые) и 5 ML (штриховые кривые) при 77 K и различных уровнях накачки, кВт/см^2 : 1 — 3.5, 2 — 1.0, 3 — 0.15, 4 — 0.04, 5 — 0.01.

малых уровнях возбуждения (10 и 40 Вт/см^2) спектры состоят только из линии излучения QD, и положение пиков ФЛ этих двух структур совпадает. При накачке более 100 Вт/см^2 спектры смещаются в коротковолновую область, что обусловлено появлением и дальнейшим

увеличением коротковолнового пика излучения от WL и насыщением излучения QD с ростом мощности накачки. Согласно [7], энергия максимума излучения WL порядка 1.9 эВ, что соответствует, по нашим оценкам, толщине WL порядка 2.5 ML (7.3 \AA). Расчеты показывают, что в сильно напряженном WL InP квантовая яма для дырок в 1.3 раза глубже, чем для электронов. Квантовые ямы содержат по одному уровню размерного квантования. Энергия связи электронов менее 6 мэВ, а дырок — порядка 100 мэВ. В квантовых же точках InP, согласно [8], энергия связи дырок 120 мэВ. Даже при низких уровнях накачки (10 Вт/см^2) смачивающий слой и QD "залиты" электронами, в то время как уровень Ферми дырок расположен на 90 мэВ ниже верха квантовой ямы WL; дырочный уровень в QD заполнен, а в WL опустошен. Заполнение дырочного уровня в WL начинается только при мощности накачки порядка 150 Вт/см^2 , когда и наблюдается смещение спектров на рис. 2 в коротковолновую область. Следует отметить, что с ростом накачки интенсивность излучения смачивающего слоя растет, а квантовых точек не изменяется в связи с насыщением уже при малых уровнях возбуждения. Однако доля излучения QD в спектре ФЛ для структуры с 5 ML больше, чем с 3 ML, что обусловлено большей плотностью QD в структуре с 5 ML (наибольшая интенсивность ФЛ QD наблюдается у структур с 6 ML InP [7]). В результате этого на рис. 2 спектральное смещение у структур с 5 ML InP более слабое, чем у структур с 3 ML.

Спектры ФЛ гетероструктуры с 3 ML InP при высоких уровнях накачки (5 кВт/см^2) при различных температу-

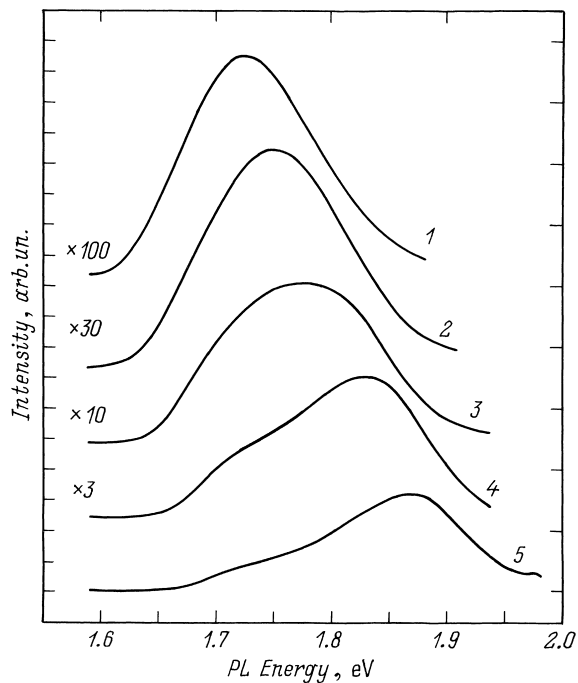


Рис. 3. Спектры фотолюминесценции структур с квантовыми точками InP при номинальной толщине осажденного слоя 3 ML, при мощности накачки 5 кВт/см^2 и различных температурах, K: 1 — 230, 2 — 200, 3 — 170, 4 — 135, 5 — 110.

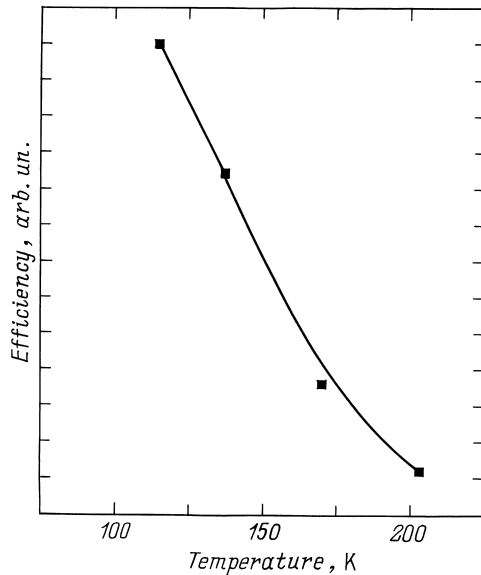


Рис. 4. Температурная зависимость эффективности люминесценции квантовых точек InP при номинальной толщине осажденного слоя 5 ML для уровня возбуждения 50 Вт/см².

рах измерения представлены на рис. 3. При температуре 110 К интенсивность излучения WL превосходит интенсивность излучения QD InP, так как объем WL больше, чем объем QD. С ростом температуры суммарная интенсивность излучения падает, причем доля люминесценции смачивающего слоя заметно уменьшается по сравнению с излучением QD, что связано, по-видимому, с сильной утечкой электронов из WL в матрицу InGaP. Таким образом, с ростом температуры квантовая эффективность люминесценции WL падает значительно быстрее, чем эффективность QD, которая для структуры с номинально осажденными 5 ML InP при 50 Вт/см² приведена на рис. 4. При 77 К эта структура имела 30% внешнюю квантовую эффективность. Такая зависимость говорит о присутствии интенсивных безызлучательных каналов, резко усиливающихся с ростом температуры. Аналогичная зависимость наблюдалась также в [8].

Проведенные оптические исследования гетероструктур InGaP/InP, выращенных методом MOCVD в режиме Странского–Крастанова, выявили особенности люминесценции таких структур. При низком уровне возбуждения и 77 К энергия излучения QD обладает более высокой температурной стабильностью, чем излучение InGaP-матрицы и напряженной QW InP. Из измерений квантовой эффективности излучения этих структур в зависимости от температуры (77–300 К) и уровня возбуждения (0.01–5 кВт/см²) следует, что спектры ФЛ, как правило, являются суперпозицией излучения квантовых точек и смачивающего слоя. Соотношение их интенсивности зависит от мощности накачки и температуры, а длина волны излучения изменяется в пределах 0.65–0.73 мкм. Собственное излучение QD InP можно получить либо при низких уровнях возбуждения и температурах, либо при максимальных (из исследованных)

значениях этих параметров. Таким образом, на основе полученных наноразмерных гетероструктур можно создавать источники излучения, легко перестраиваемые в диапазоне энергий 1.69–1.92 эВ при изменении мощности накачки или температуры.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект 98-02-18266) и программой МНРФ "Физика твердотельных наноструктур", шифр "Квинт".

Список литературы

- [1] F. Houzay, C. Guille, J.M. Moison, P. Henox, F. Barthe. *J. Cryst. Growth*, **81**, 67 (1987).
- [2] J.L. Jimenez, L.R.C. Fonseca, D.J. Brady, J.P. Leburton, D.E. Wohler, K.Y. Cheng. *Appl. Phys. Lett.*, **71**, 3558 (1997).
- [3] A.E. Zhukov, A.R. Kovsh, V.M. Ustinov, Yu.M. Shernyakov, S.S. Mikhlin, N.A. Maleev, E.Yu. Kondrat'eva, D.A. Livshits, M.V. Maximov, B.V. Volovik, D.A. Bedarev, Yu.G. Musikhin, N.N. Ledentsov, P.S. Kop'ev, Zh.I. Alferov, D. Bimberg. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **11**, 1345 (1999).
- [4] O.B. Shchekin, G. Park, D.L. Huffaker, D.G. Deppe. *Appl. Phys. Lett.*, **77**, 466 (2000).
- [5] M.K. Zundel, N.Y. Jin-Phillipp, F. Phillipp, K. Eberl, T. Riedl, E. Fehrenbacher, A. Hangleiter. *Appl. Phys. Lett.*, **73**, 1784 (1998).
- [6] O.V. Kovalenkov, D.A. Vinokurov, D.A. Livshits, I.S. Tarasov, N.A. Bert, S.G. Konnikov, Zh.I. Alferov. *Proc. 23rd Int. Symp. Compound Semicond. (St.Petersburg, 1996)* [Inst. Phys. Conf. Ser., N 155, Ch. 3, p. 271].
- [7] Д.А. Винокуров, В.А. Капитонов, О.В. Коваленков, Д.А. Лифшиц, З.Н. Соколова, И.С. Тарасов, Ж.И. Алфёров. *ФТП*, **33**, 858 (1999).
- [8] V. Zwiller, M.-E. Pistol, M.A. Odnoblyudov, L. Samuelson. *Abstracts Int. Symp. "Nanostructures: Physics and Technology"* (St.Petersburg, 1999) p. 28.

Редактор В.В. Чалдышев

Optical study of InP quantum dots

D.A. Vinokurov, V.A. Kapitonov, D.N. Nikolaev, Z.N. Sokolova, I.S. Tarasov

loffe Physicotechnical Institute,
194021 St.Petersburg, Russia

Abstract A photoluminescent study has been made of self-assembling InP nanoscale islands (quantum dots) embedded in In_{0.49}Ga_{0.51}P matrix grown on GaAs substrate by metal organic vapor phase epitaxy. The dependences of the luminescence efficiency on temperature within 77–300 K range and on the excitation level (0.01–5 kW/cm²) were obtained. It has been shown that the photoluminescent spectra represent a superposition of quantum dots and wetting layer spectra. Their shares depend on the temperature and power level. Emitting wavelength varies throughout the range of 0.65–0.73 μm. Quantum dots have a high temperature stability of the wavelength, and a high quantum efficiency at low excitation level and at 77 K.