

©1994 г.

ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ GaAs/AlAs СТРУКТУР С ИЗОЛИРОВАННЫМИ КЛАСТЕРАМИ GaAs, ВЫРАЩЕННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ С ВЫСОКИМИ ИНДЕКСАМИ МИЛЛЕРА

*М.В.Максимов, А.Ю.Егоров, А.Е.Жуков, С.В.Иванов, П.С.Копьев,
Н.Н.Леденцов, Б.Я.Мельцер, И.Г.Табатадзе, В.М.Устинов*

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе Российской академии наук,
194021, Санкт-Петербург, Россия
(Получена 22 декабря 1993 г. Принята к печати 27 декабря 1993 г.)

Осаждение небольшого количества GaAs на фасетированную поверхность AlAs (311) приводит к формированию кластеров, длина и характер распределения по поверхности которых определяются параметрами роста. Внедрение кластеров в барьер AlAs, разделяющий две квантовые ямы GaAs, приводит к появлению в спектре фотолюминесценции новых линий. Интенсивность и спектральное положение таких линий определяются геометрическими параметрами структуры и условиями роста. Значительное увеличение силы осциллятора экситона, локализованного длинными кластерами, говорит о квазидомерном характере электронного спектра в рассматриваемых структурах. В случае оптимальных условий выращивания линия, соответствующая длинным кластерам, доминирует в спектре фотолюминесценции вплоть до больших плотностей возбуждения и высоких температур наблюдения.

Создание квантово-размерных гетероструктур с размерностью ниже чем два является важным шагом, ведущим к новому прорыву как в области фундаментальных исследований, так и приборных приложений [1-6].

В ряде работ было обнаружено [7,8], что некоторые поверхности GaAs, ориентированные не по (100), фасетируются при типичных для молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) условиях роста. До недавнего времени, однако, считалось, что фасетирование осуществляется на макроскопическом уровне и степень его упорядочивания мала. Таким образом, фасетирование в основном рассматривалось как нежелательный эффект. Впоследствии было показано [9-14], что различные типы поверхностей GaAs, ориентированные не по (100), могут расщепляться на высокоупорядоченные массивы микрофасеток. Например, поверхность GaAs (311)A представляет собой упорядоченный массив микроканалов. Такая структура поверхности сохраняется во время гомоэпитаксиального роста GaAs и AlAs. Согласно [9-14], при гетерогенном ро-

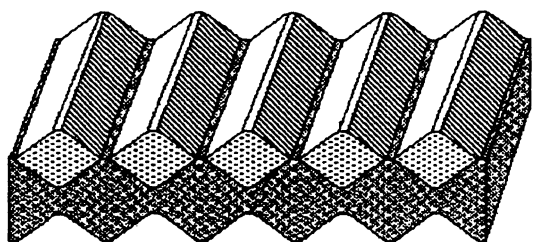
сте (например, GaAs на AlAs) сначала происходит зарождение кластеров GaAs в микроканавках, а затем формируется новый массив микрофасеток и геометрическая структура поверхности восстанавливается.

Авторы [9-14] предположили, что результирующая структура представляет собой слои GaAs с периодически меняющейся толщиной — массив квантовых проволок или корругированную (с гофрированными гетерограницами) сверхрешетку (СР), что также было подтверждено данными трансмиссионной микроскопии высокого разрешения [9,10] и исследованиями комбинационного рассеяния света в области ограниченных GaAs LO-фононов [15].

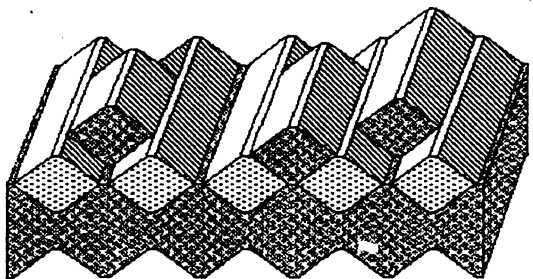
Фасетирование поверхностей и формирование на них массивов квантовых проволок и точек являются предметом интенсивных исследований в настоящее время [16-19]. Вместе с тем малый период фасетирования может служить причиной сильного взаимодействия между проволоками, что приводит к исчезновению свойств, присущих отдельным квантовым проводам [20]. Кроме того, отсутствуют детальные исследования относительно степени упорядочивания фасетированных поверхностей.

Нами был предложен метод создания изолированных квантовых проволок и точек на фасетированных поверхностях путем внедрения небольшого количества узкозонного материала в достаточно узкий барьерный слой широкозонного материала, разделяющий 2 слоя узкозонного материала. В случае планарного роста это практически не приводит к изменению свойств структуры. Если же выращивание осуществляется на фасетированной поверхности, атомы узкозонного материала могут собираться в микрокластеры и конгломераты кластеров с формой, обусловленной геометрией фасетированной поверхности. Эти кластеры оказывают влияние на энергетические уровни электронов и дырок близлежащих слоев узкозонного материала, что может привести к появлению состояний, локализованных в одном или нуле измерений.

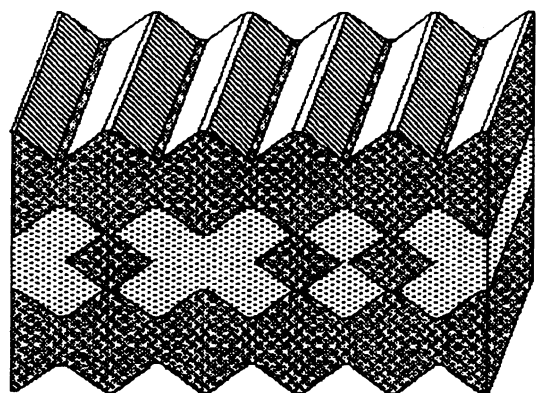
Процесс выращивания структур с квантовыми проволоками схематически представлен на рис. 1. На подложке (311)А выращивается корругированная СР GaAs-AlAs. На верхнем слое GaAs выращивается слой AlAs толщиной, достаточной для того, чтобы зарастить микроканавки на GaAs и сформировать новый массив фасеток AlAs (рис. 1,а). После этого осаждается некоторое количество GaAs, которое соответствует слою толщиной 2 Å, если бы рост осуществлялся на поверхности (100). При осаждении GaAs микроканавки в слое AlAs частично заполняются кластерами GaAs, покрывающими примерно 20% поверхности (рис. 1,б). Затем поверхность покрывается новым слоем AlAs толщиной, достаточной для формирования следующего упорядоченного массива фасеток (рис. 1,с) и сверху выращивается корругированная СР. Таким образом, две латеральные СР оказываются локально связанными посредством изолированных кластеров GaAs или их конгломератов, внедренных в центральный слой AlAs (структуры с *H*-связью). Следует отметить, что описанная выше картина роста является идеализированной и свойства реальных структур существенно зависят от степени упорядочения поверхности. Данный способ получения квантовых проволок был предложен в [21]. Некоторые данные по оптическим свойствам таких структур приведены в [22,23].



a



b



c



GaAs

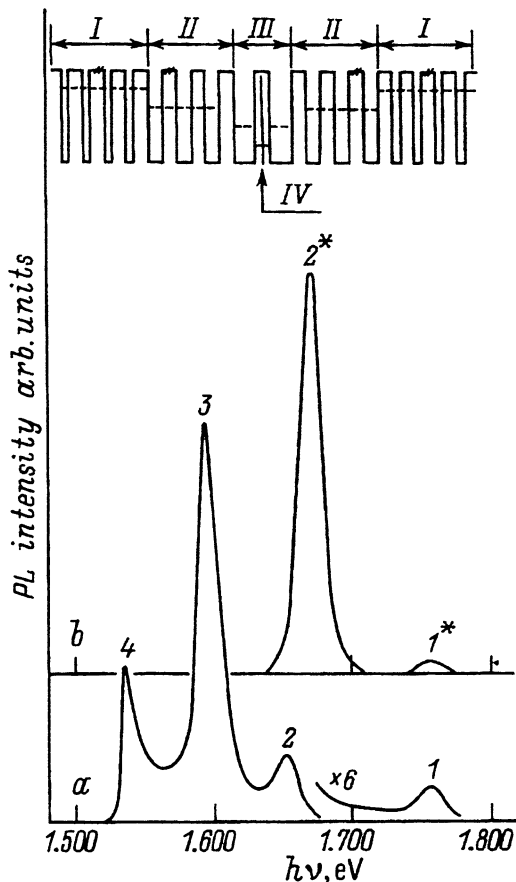


AlAs

Рис. 1. Схематическое изображение процесса выращивания структуры с квантовыми кластерами на подложке (311)A: a — формирование корригированного слоя GaAs, покрытого AlAs; b — осаждение кластеров GaAs на гофрированную поверхность AlAs; c — кластеры GaAs зарожены AlAs и на поверхности AlAs сформирован слой GaAs.

Многослойные структуры GaAs-AlAs выращивались на подложках GaAs (311)A и (100) в одном процессе методом МПЭ [24–28] при температуре 630° С в лаборатории МПЭ ФТИ им. А.Ф.Иоффе. Времена прерывания составляли 10 с на каждом интерфейсе для ограничивающих сверхрешеток и 30 с для гетерограниц двойной квантовой ямы (ДКЯ). Выращивание осуществлялось на установках Riber-32 (Франция) и EP-1203 (Россия). Рост контролировался наблюдением картины дифракции быстрых электронов (ускоряющее напряжение 20 кэВ,

Рис. 2. а — спектр ФЛ структуры с кластерами, выращенной на подложке (311)А. 1 — излучение экситонов короткопериодной СР; 2 — излучение экситонов ДКЯ; 3,4 — излучение экситонов, локализованных длинными и короткими кластерами соответственно. б — спектр ФЛ структуры, выращенной на подложке (311)А и имеющей ту же геометрию, что и исходная, но у которой кластеры GaAs в центральный барьер AlAs не внедрялись. 1* — излучение экситонов короткопериодной СР, 2* — экситонов ДКЯ. Плотность возбуждения 20 мВт/см², температура наблюдения 77 К. На вставке — схематическое изображение зонной диаграммы структуры с квантовыми кластерами: I — сверхрешетка 15 Å GaAs на 35 Å AlAs суммарной толщиной 0.2 мкм, II — сверхрешетка 30 Å GaAs на 25 Å AlAs суммарной толщиной 0.1 мкм, III — две квантовые ямы GaAs шириной по 45 Å, разделенные барьером AlAs шириной 30 Å, IV — двухангстремный слой GaAs.



угол 1°). Оптические свойства структур изучались методом фотолюминесценции (ФЛ) при температурах 77 и 300 К. Люминесценция возбуждалась линией 6328 Å He-Ne-лазера или светом лампы накаливания, пропущенным через монохроматор. Система регистрации состояла из монохроматора МДР-23 и охлаждаемого ФЭУ-83, работавшего в режиме счета фотонов.

Как уже отмечалось ранее, внедрение кластеров приводит к появлению новых линий в спектре ФЛ. Тот факт, что данные линии обусловлены именно присутствием кластеров, а не какими-либо иными причинами, подтверждается экспериментами, результаты которых представлены на рис. 2-4.

На рис. 2,а изображен спектр ФЛ структуры с кластерами, выращенной на подложке (311)А, зонная диаграмма которой схематически изображена на вставке. В спектре ФЛ присутствуют линия, соответствующая излучению экситонов в СР (кривая 1), линия, соответствующая излучению экситонов ДКЯ (кривая 2), а также новые линии, обусловленные GaAs-квантовыми проволоками и их конгломератами (кривые 3,4). На рис. 2,б приведен спектр ФЛ структуры, также выращенной на подложке (311)А и имеющей ту же геометрию, но у кото-

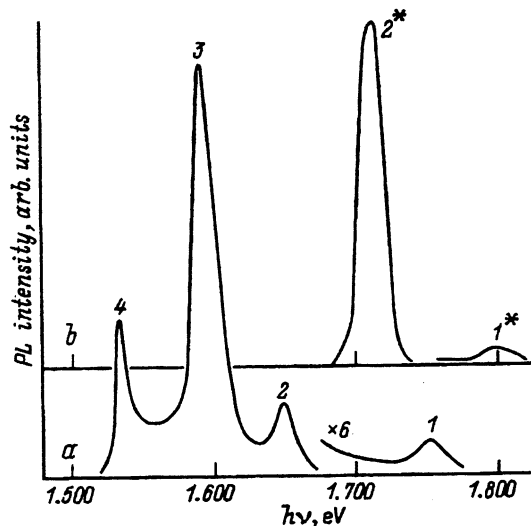


Рис. 3. *a* — спектр ФЛ структуры с кластерами, выращенной на подложке (311)А; *b* — спектр ФЛ структуры, выращенной в том же технологическом процессе на подложке (100). Линии на спектрах ФЛ обозначены так же как на рис. 2. Плотность возбуждения 20 мВт/см², температура наблюдения — 77 К.

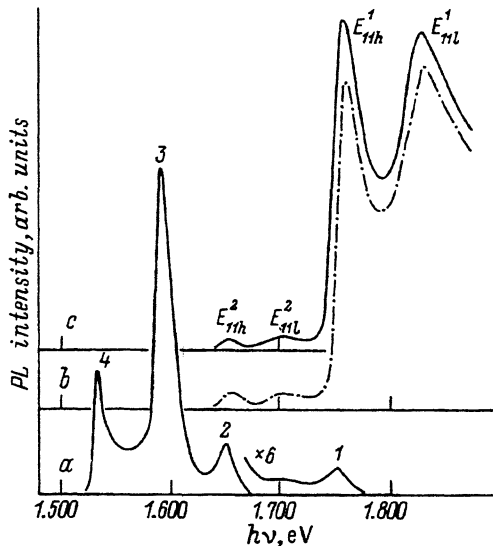
рой в центральный барьер AlAs не были внедрены кластеры GaAs. Из рисунка видно, что кластерные линии в спектре ФЛ такой структуры отсутствуют.

На следующем рисунке представлены спектр ФЛ структуры с кластерами, выращенной на подложке (311)А (рис. 3, *a*), и спектр ФЛ структуры, выращенной в том же технологическом процессе на подложке (100) (рис. 3, *b*). Кластерные линии появляются у структуры, выращенной на фасетированной поверхности (311), и отсутствуют у структуры, выращенной на планарной поверхности (100). Линии в спектре ФЛ, соответствующие двойной КЯ и СР в случае структуры, выращенной на подложке (311)А, смещены в длинноволновую сторону относительно аналогичных линий в спектре ФЛ структуры, выращенной на подложке (100), что является следствием большей величины эффективной массы тяжелых дырок и влияния гофрировки гетерограниц.

На рис. 4 приведен спектр ФЛ структуры с кластерами (*a*), а также спектр возбуждения люминесценции (СВЛ) для пиков, соответствующих излучению длинных кластеров (*b*) и их конгломератов (*c*). Оба СВЛ практически не отличаются друг от друга, на них присутствуют пики, связанные с тяжелым и легким экситоном в СР и тяжелым и легким экситоном в двойном слое GaAs. Можно сделать вывод, что, во-первых, оба кластерных пика имеют одну и ту же физическую природу и, во-вторых, линии ФЛ 1.53–1.58 эВ пространственно возникают в области, совпадающей с двойным слоем GaAs.

Нами была обнаружена сильная зависимость интенсивности кластерной линии (а значит и геометрических размеров кластеров) от технологических параметров. Эта зависимость представлена на рис. 5. У структуры, выращенной при температуре подложки 680° С (кривая 1), кластерная линия доминирует в спектре ФЛ вплоть до больших плотностей возбуждения и высоких температур наблюдения. Согласно нашей интерпретации, при таких технологических условиях образуются в основном длинные изолированные кластеры, которые могут эффективно локализовать неравновесные носители. В спектре ФЛ струк-

Рис. 4. *a* — спектр ФЛ структуры с кластерами. Линии в спектре обозначены так же, как на рис. 2, *a*; *b* — СВЛ для 3, соответствующей излучению длинных кластеров; *c* — СВЛ для 4, соответствующей излучению конгломератов кластеров. $E_{11h}^1 (E_{11l}^1)$ — энергия перехода с первого электронного уровня на первый уровень тяжелых (легких) дырок для экситонов в СР; $E_{11h}^2 (E_{11l}^2)$ — энергии аналогичных экситонных переходов в ДКЯ. Плотность возбуждения 10^{-6} Вт/см², температура наблюдения — 77 К.



туры, выращенной при 620° С (кривая III), интенсивность кластерного пика относительно невелика. По-видимому, при таких технологических условиях в основном формируются короткие кластеры, которые можно рассматривать как слабо локализирующие квантовые точки. Кривая II соответствует промежуточному случаю.

Важными параметрами, влияющими на характер формирования кластеров, являются степень упорядоченности фасетированной по-

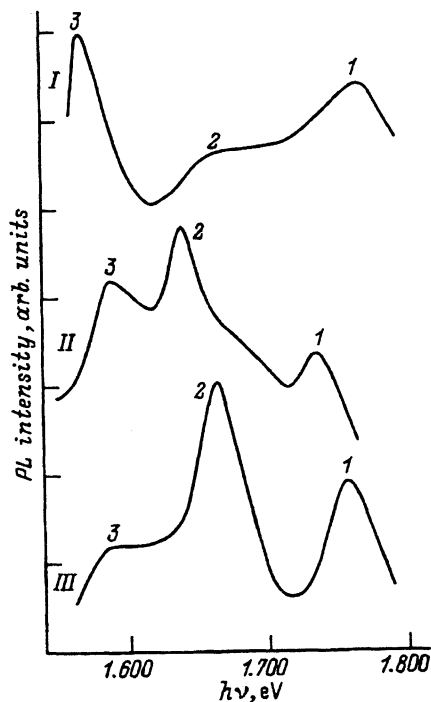


Рис. 5. Спектры ФЛ структур с кластерами, выращенных при различных температурах подложки, I, II, III соответствуют температурам подложки 680, 640 и 620° С. На всех трех графиках 1 соответствует излучению экситонов короткопериодной СР, 2 — излучению экситонов ДКЯ, 3 — излучению экситонов, локализованных кластерами. Плотность возбуждения 20 Вт/см², температура наблюдения — 77 К.

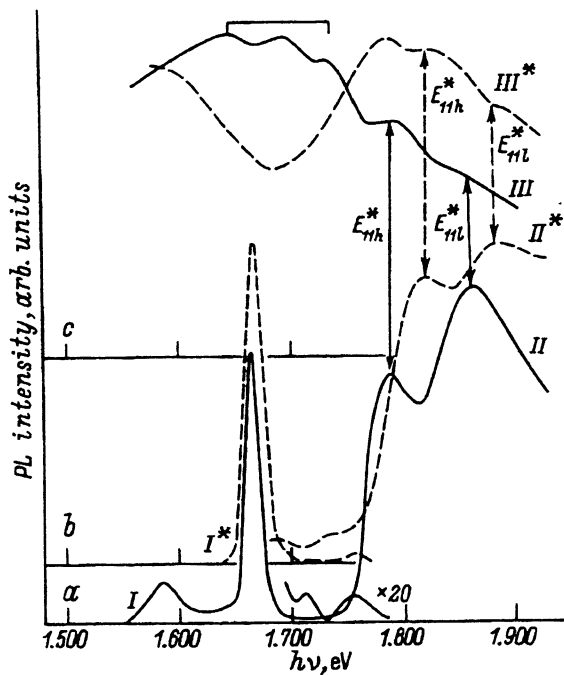


Рис. 6. а — спектр ФЛ (I) и возбуждения люминесценции (II) для структуры с квантовыми точками; б — спектры ФЛ (I*) и возбуждения люминесценции (II*) для структуры без кластеров. E_{11h} (E_{11l}) — энергия перехода с первого электронного уровня на первый уровень тяжелых (легких) дырок для экситонов в СР для структуры с кластерами, E_{11h}^* (E_{11l}^*) — энергии аналогичных переходов для структуры без кластеров; в — спектры отражения структуры с короткими кластерами (III) и без кластеров (III*). На кривой III квадратной скобкой отмечены особенности, вызванные квантовыми точками. Плотность возбуждения для спектров ФЛ и возбуждения люминесценции 10^{-6} Вт/см², температура наблюдения — 77 К.

верхности и время прерывания после осаждения двухангстремного слоя GaAs. Обнаружено, что увеличение времени прерывания способствует формированию длинных кластеров. При плохой упорядоченности поверхности формирование изолированных длинных кластеров затруднено.

Спектры ФЛ, возбуждения люминесценции и отражения структуры с квантовыми точками (короткими кластерами), выращенной при температуре 620° С, а также структуры, выращенной на подложке (311) и имеющей те же геометрические параметры, но без кластеров GaAs, представлены на рис. 6. Видно, что в спектре отражения структуры с квантовыми точками наблюдаются две особенности в области энергий, близких к положению линий тяжелого и легкого экситонов двойного слоя GaAs. Особенности, связанных с длинными кластерами, в спектре не наблюдается.

Спектр отражения образца с длинными кластерами приведен на рис. 7, в вместе со спектрами ФЛ и возбуждения люминесценции (рис. 7, а, б). В этом случае сила осциллятора переходов с участием экситонов, локализованных на кластерах, сравнима с силой осциллятора экситонных переходов в единичной квантовой яме, несмотря на то что кластерами покрыто только 20% поверхности. Данный факт находится в согласии с теорией, предсказавшей возрастание силы осциллятора на единичный объем в квазиодномерных гетероструктурах [23]. Результаты анализа спектра отражения говорят о наличии высокой степени локализации и высокой плотности состояний, связанных с длинными кластерами. Энергия тяжелого экситона на спектре возбуждения и на спектре отражения совпадает с энергией кластерного пика в спектре ФЛ.

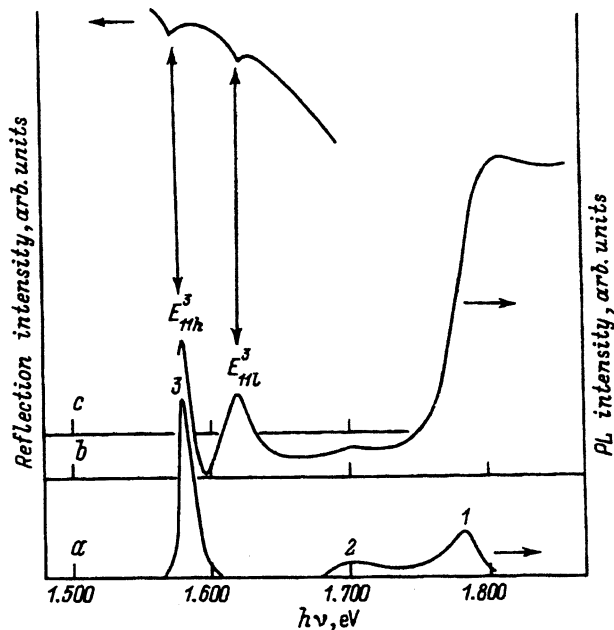


Рис. 7. *a* — спектр ФЛ структуры с длинными кластерами, линии на спектре ФЛ обозначены аналогично рис. 2, *a*; *b* — СВЛ линии 3, соответствующей излучению экситонов, локализованных длинными кластерами; *c* — спектр отражения, E_{11h}^3 (E_{11l}^3) — энергия перехода с первого электронного уровня на первый уровень тяжелых (легких) дырок для экситонов в ДКЯ, локализованных длинными кластерами. Плотность возбуждения для спектров ФЛ и возбуждения люминесценции 10^{-6} Вт/см², температура наблюдения — 77 К.

Наличие у одномерных гетероструктур описанных выше оптических свойств открывает путь к созданию нового типа оптоэлектронных приборов. Так, полупроводниковые лазеры на основе квантовых кластеров должны обеспечить меньшую пороговую плотность тока и более высокий коэффициент усиления на единичный объем узкозонного материала в активной области. Кроме того, в таких приборах должны существенно уменьшиться эффекты рассеяния и поверхностной рекомбинации неравновесных носителей [29,30].

Таким образом, в данной работе показано, что фасетируемые поверхности могут иметь различную степень упорядоченности. Длина отдельных кластерных островков GaAs и, по-видимому, AlAs сильно зависит от условий выращивания и поверхность имеет доменную структуру. Несмотря на это, при определенных технологических условиях на таких поверхностях методом МПЭ могут быть получены упорядоченные массивы изолированных квантовых кластеров. Путем изменения условий роста или геометрических параметров (температуры подложки; времени прерывания роста; доли поверхности, покрытой кластерами; ширины двойного слоя GaAs; периода ограничивающей СР, и т.д.) можно получать определенные типы кластеров (длинные, короткие кластеры, конгломераты кластеров) и реализовать существенную модификацию спектра ФЛ. Значительное увеличение силы осциллятора экситона говорит о квазиодномерном характере электронного

спектра в таких структурах. Линия, соответствующая длинным кластерам, доминирует в спектре ФЛ вплоть до больших плотностей возбуждения и высоких температур наблюдения.

Авторы выражают благодарность Российскому Фонду фундаментальных исследований за финансовую поддержку.

Список литературы

- [1] H. Sakaki. *Japan. J. Appl. Phys.*, **19**, L735 (1980).
- [2] M.L. Roukes, A. Scherer, S.J. Allen, H.G. Grainhead, R.M. Ruthen, E.D. Beebe, J.P. Harbison. *Phys. Rev. Lett.*, **59**, 3011 (1987).
- [3] M. Kohl, D. Heitman, P. Grambow, K. Ploog. *Phys. Rev. Lett.*, **63**, 2124 (1989).
- [4] M. Tsuchiya, J.M. Gaines, R.H. Yan, R.J. Simes, P.O. Holtz, L.A. Coldren, P.M. Petroff. *Phys. Rev. Lett.*, **62**, 466 (1989).
- [5] D. Gershoni, J.S. Weiner, S.N. Chu, G.A. Baraff, J.M. Vandenberg, L.N. Pfeifer, K. West, R.A. Logan, T. Tanbun-Ek. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, **65**, 1631 (1986).
- [6] S.A. Chalmers, A.C. Gossard, A.L. Weisenhorn, S.A.C. Gould, B. Drake, P.K. Hansma. *Appl. Phys. Lett.*, **55**, 2492 (1989).
- [7] P.N. Uppal, J.S. Ahearn, D.P. Musser. *J. Appl. Phys.*, **62**, 3766 (1987).
- [8] S. Subbana, H. Kroemer, J.L. Merz. *J. Appl. Phys.*, **59**, 486 (1986).
- [9] R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L.A. Däweritz, M. Hohenstein, K. Ploog. *Phys. Rev. Lett.*, **68**, 3812 (1991).
- [10] R. Nötzel, N.N. Ledentsov, L.A. Däweritz, K. Ploog, M. Hohenstein. *Phys. Rev. B*, **45**, 3507 (1992).
- [11] R. Nötzel, L.A. Däweritz, N.N. Ledentsov, K. Ploog. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 1615 (1992).
- [12] R. Nötzel, L. Däweritz, N.N. Ledentsov, K. Ploog. *Surf. Sci.*, **267**, 209 (1992).
- [13] R. Nötzel, K. Ploog. *J. Vac. Sci. Techn. B*, **10**, 2034 (1992).
- [14] R. Nötzel, L. Däweritz, K. Ploog. *Phys. Rev. B*, **46**, 4736 (1992).
- [15] A.J. Shields, R. Nötzel, M. Cardona, L. Däweritz, K. Ploog. *Appl. Phys. Lett.*, **60**, 2537 (1992).
- [16] H. Kalt, R. Nötzel, K. Ploog, H. Giessen. *Sol. St. Commun.*, **83**, 285 (1992).
- [17] Y. Yamamoto, M. Inai, T. Takebe, M. Fujii, K. Kobayashi. *Workbook 7th Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy*, August 24–28, 1992 (Schwablische Gemund, Germany) Th2.3.
- [18] R. Mirin, M. Krishnamurthy, J. Ibbetson, J. English, A. Gossard. *Workbook 7th Int. Conf. on Molecular Beam Epitaxy*, August 24–28, 1992 (Schwablische Gemund, Germany) ThP.3.
- [19] M. Sato, K. Maehashi, H. Asahi, S. Hasegawa, H. Nakashima. *Superlatt. Microstruct.*, **7**, 279 (1990).
- [20] J. Chang Yi, N. Dagli, L.A. Coldren. *Appl. Phys. Lett.*, **59**, 3015 (1991).
- [21] N.N. Ledentsov. *Report on the NATO ASI School on the Optical Properties of Semiconductors*, March 7–19, 1992 (Erice, Italy).
- [22] Zh.I. Alferov, A.Yu. Egorov, A.E. Zhukov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov, B.Ya. Meltser, V.M. Ustinov. *Fiz. Tëkn. Poluprovod. (Sov. Phys. Semicond.)*, **26**, 1715 (1992).
- [23] E.L. Ivchenko, A.V. Kavokin, V.P. Kochereshko, P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov. *Proc. 6th Int. Conf. on Semicond. Superlat., Microstruct. a. Microdevices*, August 4–7, 1992.
- [24] P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov. *Sov. Phys. Semicond.*, **22**, 1093 (1988).
- [25] S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov. *J. Cryst. Growth*, **104**, 345 (1990).
- [26] S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov. *J. Cryst. Growth*, **108**, 661 (1991).
- [27] S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov. *Mater. Sci. Forum*, **69**, 9 (1991).
- [28] S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev and N.N. Ledentsov. *J. Cryst. Growth*, **111**, 151 (1991).
- [29] Zh.I. Alferov, S.V. Ivanov, P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov, M.E. Lutsenko, B.Ya. Meltser, M.I. Nemenov, S.V. Shaposhnikov, *Sov. Phys. Semicond.*, **24**, 92 (1990).
- [30] P.S. Kop'ev, N.N. Ledentsov. *Sov. Phys. Semicond.*, **24**, 1058 (1990).

Редактор В.В. Чалдышев