

06;07;12

Инжекционный гетеролазер на основе квантовых точек с выходной мощностью излучения 3.3 W

© А.Р. Ковш, Д.А. Лившиц, А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров,
М.В. Максимов, В.М. Устинов, И.С. Тарасов, Н.Н. Леденцов,
П.С. Копьев, Ж.И. Алферов, D. Bimberg

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург
Institut für Festkörperphysik, Technische Universität Berlin
Hardenbergstr. 36, D-10623 Berlin, Germany

Поступило в Редакцию 1 марта 1999 г.

Реализована непрерывная лазерная генерация через основное состояние составных вертикально-связанных квантовых точек InAlAs/InGaAs в матрице AlGaAs с выходной мощностью излучения 3.3 W на оба зеркала при комнатной температуре.

Последние несколько лет в физике полупроводников существует повышенный интерес к структурам с самоорганизующимися квантовыми точками (КТ) [1], принципиальным отличием которых от структур с квантовыми ямами является дельта-образная плотность состояний. Данная особенность позволяет надеяться на кардинальное улучшение характеристик полупроводниковых лазеров [2,3]. К настоящему моменту достигнут значительный прогресс в данной области. В различных системах материалов реализована лазерная генерация через основное состояние КТ с пороговыми плотностями тока 63 A/cm^2 [4] и 11 A/cm^2 [5] при комнатной температуре и температуре жидкого азота соответственно.

К настоящему времени вопрос о возможности реализации высокой выходной мощности в лазерных диодах на основе КТ остается недостаточно изученным. В работе [6] нами сообщалось о непрерывной лазерной генерации в структуре с активной областью на основе КТ InGaAs/AlGaAs с выходной мощностью 1 W при комнатной температуре. Совершенствование процесса формирования КТ [7] позволило нам увеличить данное значение до 1.5 W [8]. В данной работе мы сообщаем

о создании лазера на основе самоорганизующихся КТ с максимальной выходной мощностью 3.3 W.

Одним из основных механизмов, ограничивающих мощность полупроводниковых лазеров, является выгорание спектральных дыр (см. [9] и ссылки в ней), что связано с конечной скоростью захвата носителей заряда на участвующие в лазерной генерации состояния. В связи с тем что времена захвата в структурах с квантовыми точкам InGaAs/AlGaAs достаточно велики (десятки пикосекунд [10]), а сам массив КТ характеризуется конечным количеством состояний, определяемым его поверхностной концентрацией, долгое время существовал определенный скептицизм в отношении использования КТ для лазерных применений, требующих высокой мощности излучения. Увеличение концентрации КТ может быть произведено за счет использования нескольких слоев с КТ [11], а также при их формировании на vicинальных поверхностях [12]. В работе [7] нами был предложен альтернативный подход, позволяющий увеличивать поверхностную концентрацию КТ в каждом слое. Основная идея данного подхода состоит в использовании более плотных массивов КТ InAlAs в качестве центров стимулированного формирования КТ InGaAs, непосредственно участвующих в лазерной генерации. В итоге формируется массив составных вертикально-связанных КТ с поверхностной концентрацией, задаваемой КТ InAlAs, в то время как энергия оптического перехода определяется КТ InGaAs. Указанный метод использовался при формировании активной области изучаемого в данной работе лазера.

Структура была выращена методом молекулярно-пучковой эпитаксии (МПЭ) с твердотельным источником As₄ в установке Riber 32P на подложке n⁺-GaAs(100). Была выбрана стандартная геометрия двойной гетероструктуры с отдельным ограничением носителей и световой волны (РО ДГС) с градиентным волноводом. Схема исследуемой структуры показана на рис. 1, на вставке приведено изображение поперечного сечения активной области, которая помещалась в середину волноводного слоя толщиной 0.5 μm и представляла собой массив составных вертикально-связанных квантовых точек. Первые три ряда КТ формировались посредством осаждения слоев InAlAs толщиной 5.3 монослоя (МС), разделенных спейсерами Al_{0.15}GaAs толщиной 5 nm, затем проводилось осаждение трех слоев КТ InGaAs, разделенных такими же спейсерами. Переход от двумерного к трехмерному режиму роста In-содержащих слоев наблюдался непосредственно в процессе

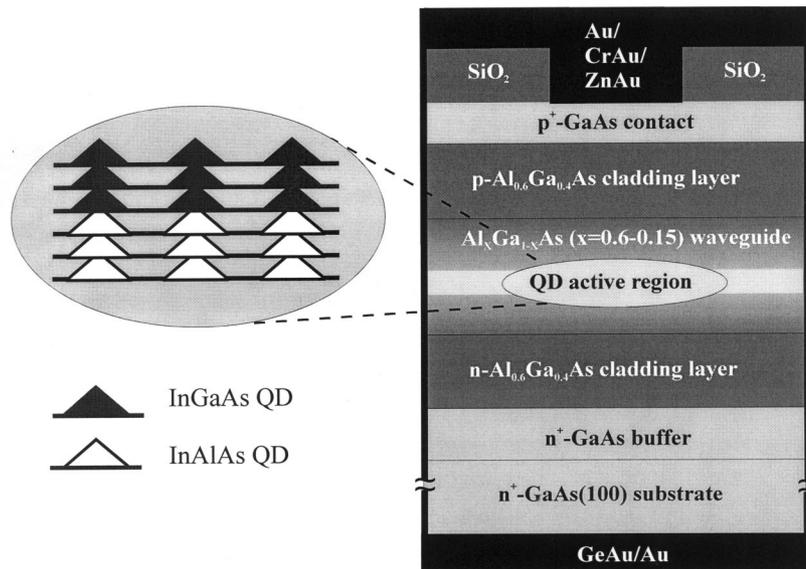


Рис. 1. Схематическое изображение лазерных диодов с активной областью на основе составных вертикально-связанных квантовых точек InAlAs/InGaAs в матрице AlGaAs.

выращивания по возникновению штриховой картины в дифракции быстрых электронов (ДБЭ) на отражение. Температура роста при осаждении активной области равнялась 485°C, в то время как температура подложки при росте волновода и эмиттеров составляла 600 и 700°C соответственно. Рост всей структуры проводился в стандартных для МПЭ условиях обогащения по мышьяку.

Из данной структуры изготавливались полосковые лазеры шириной $W = 100 \mu\text{m}$ по технологии "широкого контакта". В качестве изолятора, формирующего полосковый контакт, использовался слой SiO₂ толщиной 0.2 μm , нанесенный магнетронным распылением кремния в атмосфере кислорода. К слою p⁺-GaAs контакт был выполнен напылением и вжиганием сплавов ZnAu и CrAu, а также усилением золотом для лучшего смачивания индием при последующем напайвании на тепло-

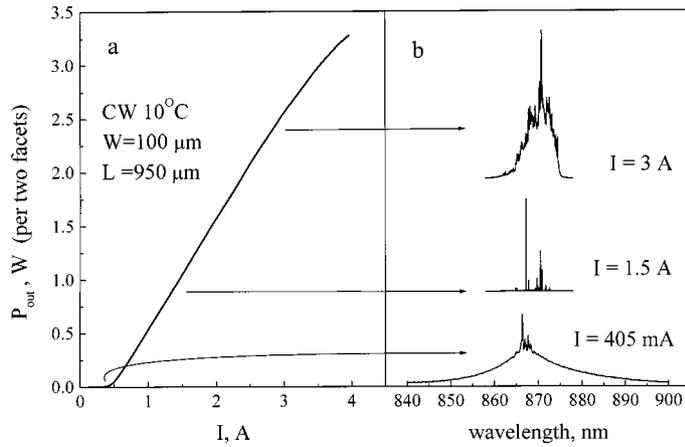


Рис. 2. Ватт-амперная характеристика лазера в непрерывном режиме при 10°C (a); спектры лазерной генерации при различных токах накачки (b).

отвод. Контакт к n^+ -GaAs подложке выполнен напылением GeAu и усилен золотом. Напыления диэлектрических покрытий на зеркала не производилось.

Лазеры накаивались индием p -стороной на медный теплоотвод и измерялись в непрерывном режиме при температуре теплоотвода 10°C . Ватт-амперная характеристика лазерного диода с длиной резонатора $L = 950 \mu\text{m}$ приведена на рис. 2, a. На рис. 2, b показаны спектры электролюминесценции данного лазера при различных токах накачки. Пороговый ток составил $I_{th} = 402 \text{ mA}$, что соответствует плотности тока 423 A/cm^2 . Максимальная мощность излучения (P_{out}) и дифференциальная квантовая эффективность (η_d) на линейном участке характеристики на оба зеркала составили 3.28 W и 73% соответственно. Начиная с тока 2.7 A , наблюдается загиб ватт-амперной характеристики, связанный с разогревом активной области лазера, что также приводит к закономерному длинноволновому сдвигу максимума генерации.

Используемый в данной работе метод увеличения поверхностной концентрации КТ позволяет увеличить максимальный ток, протекающий через структуру в режиме лазерной генерации, который ограничен

конечным числом КТ и временем захвата носителей в них, а также уменьшить заселенность состояний матрицы при одном и том же уровне накачки, что в свою очередь позволяет уменьшить паразитные токи и перегрев структуры, вызванные рекомбинацией через более высоко лежащие состояния. Оба указанных момента являются чрезвычайно важными для достижения высокой выходной мощности излучения.

Таким образом, в данной работе получено значение выходной мощности в лазере на основе КТ 3.3 W, что является рекордным значением для лазеров на основе КТ, и тем самым продемонстрирована принципиальная возможность использования подобных лазеров для применений, требующих высокой выходной мощности излучения.

Работа выполнена при поддержке программы INTAS 96–0467 и программы BMBF 13 № 7231.

Список литературы

- [1] Goldstein L., Glas F., Marzin J.Y., Charasse M.N., Le Roux G. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47(10). P. 1099–1101.
- [2] Arakawa Y., Sakaki H. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. N 11. P. 939–941.
- [3] Asada M., Miyamoto Y., Suematsu Y. // J. Quantum Electron. 1986. QE-22. P. 1915–1921.
- [4] Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Kovsh A.R., Zhukov A.E., Maksimov M.V., Tsatsul'nikov A.F., Gordeev N.Yu., Zaitsev S.V., Shernyakov Yu.M., Bert N.A., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ledentsov N.N., Bohrer J., Bimberg D., Kosogov A.O., Werner P., Gosele U. // J. Cryst. Growth. 1997. V. 175/176. P. 689–695.
- [5] Ustinov V.M., Zhukov A.E., Egorov A.Yu., Kovsh A.R., Zaitsev S.V., Gordeev N.Yu., Kopchatov V.I., Ledentsov N.N., Tsatsul'nikov A.F., Volovik B.V., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Ruvimov S.S., Liliental-Weber Z., Bimberg D. // Electron. Lett. 1998. V. 34(7). P. 670–672.
- [6] Шерняков Ю.М., Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Зайцев С.В., Ковш А.Р., Крестников И.Л., Лунев А.В., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Сахаров А.В., Устинов В.М., Чжао Чжень, Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23(4). С. 51–54.
- [7] Ковш А.Р., Жуков А.Е., Егоров А.Ю., Устинов В.М., Шерняков Ю.М., Максимов М.В., Цацульников А.Ф., Воловик Б.В., Лунев А.В., Леденцов Н.Н., Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. // ФТП. 1998. Т. 32(9). С. 1114–1118.

- [8] Шерняков Ю.М., Егоров А.Ю., Воловик Б.В., Жуков А.Е., Ковш А.Р., Лунев А.В., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Сахаров А.В., Устинов В.М., Чжао Чжэнь, Копьев П.С., Алферов Ж.И., Бимберг Д. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24(9). С. 50–55.
- [9] Kirstaedter N., Schmidt O., Ledentsov N.N., Grundmann M., Bimberg D., Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Zhukov A.E., Maximov M.V., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Kosogov A.O., Gosele U., Heydenreich J. // New York, USA: IEEE. 1995. V. 1. P. 290–291.
- [10] Makino T., Evans J.D., Mak G. // Appl. Phys. Lett. 1997. V. 71(20). P. 2871–2873.
- [11] Xie Q., Madhukar A., Chen P., Kobayashi N. // Phys. Rev. Lett. 1995. V. 75. P. 2542.
- [12] Евтихийев В.П., Кудряшов И.В., Котельников Е.Ю., Токранов В.Е., Тутков А.Н., Тарасов И.С., Алферов Ж.И. // ФТП. 1998. Т. 32(12). С. 1482–1486.