

06.3;07

Низкопороговый инжекционный гетеролазер на основе квантовых точек с длиной волны генерации $1.84 \mu\text{m}$

© В.М. Устинов, А.Р. Ковш, А.Е. Жуков, А.Ю. Егоров,
Н.Н. Леденцов, А.В. Лунев, Ю.М. Шерняков, М.В. Максимов,
А.Ф. Цацульников, Б.В. Воловик, П.С. Копьев, Ж.И. Алферов

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 12 августа 1997 г.

Использование квантовых точек InAs в матрице InGaAs, решеточно согласованной с подложкой InP, позволяет значительно увеличить длину волны излучения в лазерах на основе квантовых точек. Впервые реализована лазерная генерация через состояния квантовых точек на длине волны $1.84 \mu\text{m}$ (77 K) при пороговой плотности тока 64 A/cm^2 .

Использование нульмерных объектов — квантовых точек — позволит существенно улучшить характеристики полупроводниковых лазеров [1]. Эффект спонтанной трансформации упругонапряженного слоя в массив трехмерных островков [2,3] был использован для создания массивов квантовых точек в активной области инжекционного лазера [4]. Обнаружено, что данные лазеры демонстрируют низкую пороговую плотность тока (25 A/cm^2 , 77 K; 65 A/cm^2 , 300 K) [5] и обладают повышенной температурной стабильностью порогового тока (характеристическая температура $T_0 > 400 \text{ K}$) по сравнению с лазерами на основе квантовых ям, в согласии с теоретическими предсказаниями [1]. Кроме того, был реализован непрерывный режим лазерной генерации через основное состояние квантовых точек (In, Ga)As при комнатной температуре [5,6].

К настоящему времени показано, что длина волны излучения квантовых точек InGaAs, полученных на подложках GaAs, ограничена в длинноволновом пределе значениями $1.27\text{--}1.3 \mu\text{m}$ [7,8], а лазерная генерация наблюдалась в спектральном диапазоне $0.9\text{--}1.1 \mu\text{m}$. С другой стороны, для ряда практических применений, в частности в системах волоконной оптической связи и контроля загрязнения окружающей среды, требуется

увеличение длины волны излучения в область среднего инфракрасного диапазона.

Ранее нами было показано, что продвинуться в интересующий диапазон длин волн позволяет использование массивов квантовых островков InAs, помещенных в матрицу $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$, выращенную на подложке InP (100) [9]. Увеличение длины волны излучения в данном случае по сравнению с квантовыми точками (In, Ga)As в матрице GaAs обусловлено в первую очередь применением более узкозонной матрицы. Наибольшая достигнутая длина волны излучения составляет $1.944 \mu\text{m}$ (77 К).

В данной работе мы впервые сообщаем о реализации лазерной генерации на длине волны $1.84 \mu\text{m}$ через состояние квантовых точек InAs, помещенных в матрицу (In, Ga)As, согласованную по параметру решетки с InP.

Методом молекулярно-пучковой эпитаксии с твердотельным источником As₄ в установке Riber 32P была выращена лазерная структура, схематическое изображение которой показано на рис. 1. Непосредственно на подложке n^+ -InP (100), служащей в качестве нижнего эмиттера, осаждали волноводный слой $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной $0.6 \mu\text{m}$. В середину волноводного слоя помещали три слоя квантовых точек InAs, разделенных спейсерными слоями $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной 5 nm. Эффективная толщина осажденного InAs в каждом цикле составляла 7 монослоев. Верхний эмиттер представлял собой $1.5 \mu\text{m}$ p^+ -слой $\text{In}_{0.52}\text{Al}_{0.48}\text{As}$. Структура заканчивалась контактным p^+ -слоем $\text{In}_{0.53}\text{Ga}_{0.47}\text{As}$ толщиной $0.6 \mu\text{m}$. В качестве примеси p -типа использовался Be. Температура роста всей структуры составляла 500°C , а скорость роста 10 nm/min для слоев InGa(Al)As и 5 nm/min при осаждении InAs в активной области. Рост проводили в условиях обогащения мышьяком.

Полосковые лазеры шириной $100 \mu\text{m}$ формировали в конструкции "мелкая меза". В качестве омических контактов к p^+ -слою использовались сплавы Ti/AuZn/Ni/Au, а к n^+ -InP-подложке Au: Te/Ni/Au. Контактный слой p^+ -InGaAs вне полоска стравливали с помощью ионно-пучкового травления Ar (600 eV). Мезаструктура пассивировалась химически и защищалась слоем Al_2O_3 толщиной $0.2 \mu\text{m}$ методом реактивного магнетронного напыления. Электролюминесцентные измерения проводили в импульсном режиме при частоте 5 kHz и длительности импульсов $1 \mu\text{s}$ при температуре наблюдения 77 К. Фотолюминесценцию исследовали на структурах с удаленным верхним контактным слоем, возбужда-

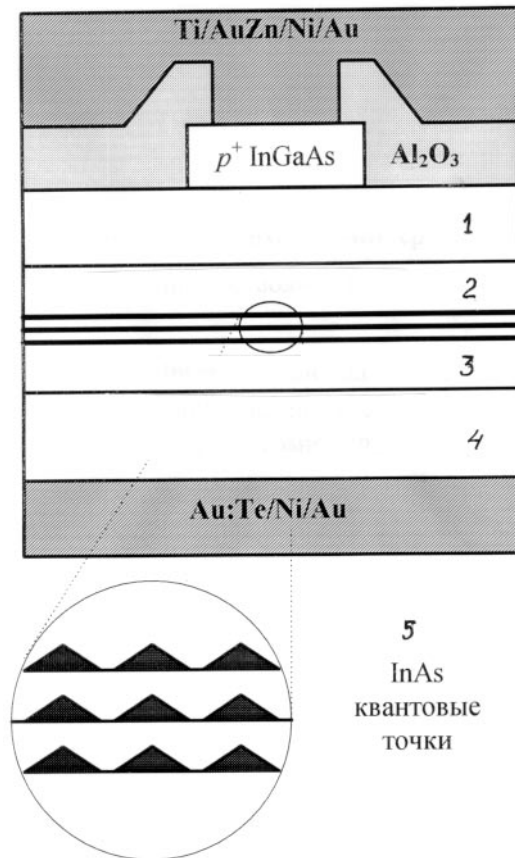


Рис. 1. Схематическое изображение лазерной структуры с активной областью на основе InAs квантовых точек в матрице InGaAs, выращенной на подложке InP: 1 — p-n-AlAs верхний эмиттер; 2,3 — InGaAs волновод; 4 — n⁺-InP(100) подложка, нижний эмиттер; 5 — InAs квантовые точки.

ли полупроводниковым GaAs-лазером и регистрировали охлажденным InSb-фотодиодом. Мощность возбуждения составляла 100 W/cm².

Переход от двумерного к трехмерному режиму роста InAs наблюдался непосредственно в процессе выращивания по возникновению

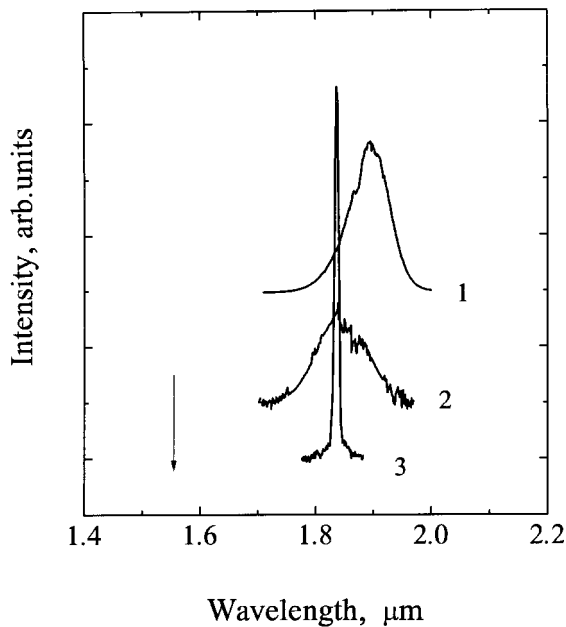


Рис. 2. Спектры фото- (кривая 1) и электролюминесценции (кривые 2,3) исследованной лазерной структуры. Плотность тока накачки составляет 13 и 70 A/cm^2 (кривые 2,3 соответственно). Стрелкой показано положение краевой люминесценции InGaAs-матрицы.

штриховой картины в дифракции быстрых электронов на отражение. Данные просвечивающей электронной микроскопии [9,10] подтверждают формирование в активной области трехмерных напряженных островков. Средний диаметр основания островков составляет приблизительно 50 nm при высоте приблизительно $4\text{--}5 \text{ nm}$.

Пороговая плотность тока в полосковом лазере длиной 1.25 nm составила 64 A/cm^2 , что сравнимо с лучшими значениями пороговой плотности тока лазеров с активной областью на основе квантовых точек InGaAs, выращиваемых на GaAs-подложках. Длина волны генерации составила 1.84 μm , что существенно превышает значения, достигнутые ранее в лазерах с активной областью на основе квантовых точек в матрице (Al, Ga)As на подложках GaAs.

На рис. 2 приведены электролюминесцентные спектры при плотностях тока накачки 13 и 70 А/см², что соответствует 0.2 и 1.1 J_{th}. Для сравнения на рис. 2 приведен также спектр фотолюминесценции при малом (~ 100 W/см²) уровне возбуждения. Как было показано нами в [9], данная линия фотолюминесценции обусловлена излучательной рекомбинацией неравновесных носителей через состояния квантовых точек. Форма линии определяется разбросом островков по размерам. Из сравнения спектров фотолюминесценции и электролюминесценции видно, что линия лазерной генерации лежит в пределах полосы люминесценции квантовых точек. Следовательно, генерация происходит через состояния квантовых точек. Расположение линии генерации на коротковолновой стороне спектра фотолюминесценции свидетельствует, по-видимому, о том, что в генерации участвуют островки, обладающие меньшим размером по отношению к среднему размеру ансамбля островков и, следовательно, имеющие меньшую энергию локализации носителей.

Таким образом, в результате данной работы впервые реализована низкопороговая (64 А/см²) лазерная генерация в структурах с квантовыми точками на длине волны 1.84 μm.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 96-02-17824).

Список литературы

- [1] Arakawa Y, Sakaki H. // Appl. Phys. Lett. 1982. V. 40. P. 939.
- [2] Goldstein L., Glas F., Marzin J.Y., Charasse M.N., Le Roux G. // Appl. Phys. Lett. 1985. V. 47. P. 1099.
- [3] Petroff P.M., Den Baars S.P. // Superlat. Microstruct. 1994. V. 15. P. 15.
- [4] Kirstaedter N., Ledentsov N.N., Grundmann M., Bimberg D., Ustinov V.M., Ruvimov S.S., Maximov M.V., Kop'ev P.S., Alferov Zh.I., Richter U., Werner P., Gosele U., Heydenreich J. // Electron. Lett. 1994. V. 30. P. 1416.
- [5] Ustinov V.M., Egorov A.Yu., Kovsh A.R., Zhokov A.E., Ledentsov N.N., 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.
- [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. В. 4. С. 51.

- [7] *Егоров А.Ю., Жуков А.Е., Копьев П.С., Леденцов Н.Н., Максимов М.В., Устинов В.М., Цацульников А.Ф., Алферов Ж.И., Федоров Д.Л., Бимберг Д.* // ФТП. 1996. Т. 30. С. 1345.
- [8] *Mirin R.P., Ibbetson J.P., Nishi K., Gossard A.C., Bowers J.E.* // Appl. Phys. Lett. 1995. V. 67. P. 3795.
- [9] *Устинов В.М., Жуков А.Е., Цацульников А.Ф., Егоров А.Ю., Ковш А.Р., Максимов М.В., Суворова А.А., Берт Н.А., Копьев П.С.* // ФТП. 1997 (в печати).
- [10] *Ustinov V.M., Weber E.R., Ruvimov S., Liliental-Weber Z., Zhukov A.E., Egorov A.Yu., Kovsh A.R., Tsatsul'nikov A.F., Kop'ev P.S.* // Appl. Phys. Lett. 1997 (в печати).